



PARAMETRES HYDRIQUES DES SOLS DANS UN AMENAGEMENT EN BANQUETTES ANTI-EROSIVES (EL GOUAZINE, TUNISIE)

Mémoire de D.E.A. de S.E.E.C.

Dirigé par M. Jean ALBERGEL

Soutenu le 26 septembre 2003 à Montpellier

Par M. Youssef ALALI

Devant Le Jury M. M. DESBORDES
M. A. DELACOURT
M. J. ALBERGEL

Remerciements

C'est avec ma reconnaissance la plus sincère que je voudrais remercier tous ceux qui, m'ont aidé à mener à bien ce mémoire :

J'adresse mes sincères remerciements :

Aux responsables du laboratoire d'accueil LISAH : **M. VOLTZ**, Directeur de l'UMR Laboratoire d'étude des Interactions, Sol, Agrosystème et Hydrosystème pour m'avoir accueilli au sein du LISAH, et **M. ALBERGEL**, pour avoir accepté de diriger patiemment mon stage, et pour m'avoir soutenu pendant toute la période du DEA.

Aux membres du Jury : **M. DESBORDES** et **M. DELACOURT** pour avoir accepté de juger ce travail et pour leurs cours de *D.E.A.* qui ont amélioré ma formation scientifique.

A **M. TOUMA**, **M. ZANTE** pour leur aide et pour le temps qu'ils m'ont consacré.

A **M. COLLINET**, **M. MOUSSA**, pour leurs conseils et leurs informations techniques

A **Mme. TROTOUX VERPLANCKE** et à **M. PEPIN** et tous les membres du laboratoire pour leur aide et pour leur gentillesse.

En Tunisie : *Je tiens à remercier :*

M. REJEB, Directeur de l'INRGREF¹ et **M. CORNET**, Représentant de l'IRD² en Tunisie, pour avoir permis que le stage de terrain se passe dans ce pays et pour avoir facilité mes démarches administratives relatives au visa et au séjour.

M. LAMACHERE et **M. NASRI**, qui m'ont aidé à préparer et réaliser les manipulations de terrain, je les remercie particulièrement pour leurs conseils et leur aide très précieuse.

M. BEN YOUNES LOUATI pour sa disponibilité sur le terrain en Tunisie et sa générosité.

M. AMROUNI, Directeur de la Direction des sols de l'ACTA³ pour la réalisation des analyses.

Tous les membres de l'INRGREF et de l'IRD en Tunisie pour leurs aides logistiques sur le terrain.

Je voudrais adresser mes sincères remerciements à mes amis, pour leur soutien moral et pour leur bonne humeur. Cela m'a beaucoup encouragé, je remercie particulièrement **Basel** et **Khanom**.

Je remercie aussi très vivement, mes collègues de DEA, surtout : **Abdelilah**, **Cécile**, **Géraldine**, **Guillaume**, **Mathieu**, qui m'ont soutenu aux moments difficiles.

Je ne pourrais jamais oublier le soutien de l'étranger des personnes chères, de ma famille en Syrie, qui m'ont apporté la confiance.

Je veux remercier toutes les personnes qui y ont plus ou moins directement contribué à ce travail.

¹ INRGREF : Institut National de Recherche en Génie Rural et Eaux et Forêts

² IRD : Institut de Recherche pour le Développement

³ ACTA : Direction générale de l'Aménagement et de la Conservation des Terres Agricoles

Resumé

Le travail abordé dans ce mémoire de DEA concerne la caractérisation hydrodynamique d'un site aménagé en banquettes anti-érosives. Cette caractérisation est une première étape pour la modélisation sur des bases physiques du fonctionnement de cet aménagement. On veut à terme, simuler les volumes d'eau et les quantités de sédiments qui sont accumulés derrière chaque bannette.

Le site d'étude se trouve dans le petit bassin versant du lac collinaire d'El Gouazine en Tunisie centrale. Il s'agit d'un aménagement sur un sol sable argileux sur lequel est pratiqué une rotation céréales - jachères. Le climat est de type méditerranéen semi aride.

Une expérimentation d'infiltration a été menée en avril 2003. Cinq dispositifs d'infiltration sous charge constante et dans un double anneau (infiltration Müntz) ont été suivis. Quarante sept essais d'infiltration dans un simple anneau avec apports successifs d'une même quantité d'eau (infiltration Beerkan) ont été mis en oeuvre.

L'ensemble de ces expériences a permis de caractériser le site par les valeurs moyenne, médiane et écart type de la conductivité hydraulique à saturation.

La variabilité spatiale de ce paramètre relativement modérée sur la surface testée (0.845 ha) a été comparée à la répartition des états de surfaces et des textures du sol. Une corrélation négative a été mise en évidence entre le Ks et les pourcentages d'éléments fins (argile) et une corrélation positive entre le Ks et les pourcentages en éléments grossiers.

Table des matières

Remerciements.....	2
Resumé.....	3
Table des matières.....	4
Liste des figures.....	5
Liste des tableaux.....	5
Introduction.....	6
Partie 1 : Présentation du site d'étude : Le bassin versant d'El Gouazine.....	9
1.1 Le bassin versant : Localisation et caractérisations éco-géographiques.....	9
1.2 Les sites de banquettes.....	11
1.3 Site de banquettes El Gouazine 1 (EG1).....	14
Partie 2 : Méthodologie.....	17
2.1 Présentation du modèle projeté pour simuler l'écoulement et l'érosion.....	17
2.1.1 Production du ruissellement.....	17
2.1.2 Propagation du ruissellement.....	18
2.1.3 Production et transfert des matières solides.....	19
2.1.4 Conclusion.....	20
2.2 Mesures de l'infiltration.....	20
2.2.1 Méthode Beerkan.....	20
2.2.2 Méthode Müntz.....	22
2.2.2.1 Le modèle de Philip.....	22
2.2.2.2 Le modèle de Green et Ampt.....	23
2.3 Caractérisation des états de surface du sol.....	24
2.3.1 Les types d'états de surface.....	24
2.3.2 La couverture du sol.....	24
2.3.3 Méthode d'évaluation des états de surface et la couverture du sol.....	25
Partie 3 : Résultats et discussion.....	26
3.1 Choix du site et distribution des mesures.....	26
3.2 Essais d'infiltration.....	27
3.2.1 Essais Beerkan.....	27
3.2.2 Essais Muntz.....	32
3.3 Caractéristiques physiographiques du site et comparaison avec les paramètres hydrodynamiques.....	38
3.3.1 Les états de surface.....	38
3.3.1.1 Surfaces fermées.....	40
3.3.1.2 Surfaces ouvertes.....	40
3.3.1.2 Surfaces couvertes.....	41
3.3.2 Relation K_s - états de surface.....	43
3.3.3 Etude de la texture des sols.....	43
3.3.4 Relation K_s - granulométrie.....	45
Conclusion et perspective.....	47
Annexe 1 : Exemple du traitement complet par BEST 2 de l'essai (B15).....	51
Annexe 2 : L'humidité initiale, l'humidité à saturation et la densité apparente, dans les essais Beerkan.....	63
Annexe 3 : Les coordonnées des sites des essais d'infiltration.....	64
Annexe 4 : La granulométrie du sol dans les sites des essais d'infiltration.....	65
Annexe 5 : Les états de surface, observations et mesures.....	66

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du bassin versant d'El Gouazine (<i>in</i> Mansouri, 2001).....	9
Figure 2 : Carte géologique du B.V. d'El Gouazine (<i>in</i> Mansouri 2001).....	10
Figure 3 : Carte pédologique du B.V. d'El Gouazine (<i>in</i> Mansouri 2001).....	10
Figure 4 : Carte d'occupation des sols du B.V.d'EL Gouazine (<i>in</i> Mansouri 2001).....	11
Figure 5 : Schéma de section de la banquette	12
Figure 6 : Banquettes du site EG1 après une pluie (ph. Nasri 2002)	12
Figure 7 : Evolution de la sédimentation du barrage	13
Figure 8 : carte de situation des travaux en banquette- Sites d'étude.	14
Figure 9 : Modèle numérique de terrain du bassin inter-banquette EG1	15
Figure 10 : Site EL GOUAZINE I, détail de la banquette de terre.....	15
Figure 11 : Variations d'humidité en surface de l'inter-banquette	16
Figure 12 : la propagation du front d'humectation selon Green et Ampt.....	23
Figure 13 : Localisation des essais de l'infiltration sur une carte topographique du terrain ...	26
Figure 14 : Essai Beerkan	27
Figure 15 : La lame infiltrée en fonction de temps (essai Beerkan 13).	28
Figure 16 : Répartition des Ks observés.....	30
Figure 17 : Délimitation de zones à différentes perméabilités.....	31
Figure 18 : Variogramme sur Ks.....	31
Figure 19 : Essai Müntz	32
Figure 20 : Ajustement de lois d'infiltration à l'expérimentation en M1	33
Figure 21 : Ajustement de lois d'infiltration à l'expérimentation en M2	34
Figure 22 : Ajustement de lois d'infiltration à l'expérimentation en M3	34
Figure 23 : Ajustement des lois d'infiltration à l'expérimentation en M4.....	35
Figure 24 : Ajustement des lois d'infiltration à l'expérimentation en M5.....	36
Figure 25 : Les profils d'humidité dans le site M1	37
Figure 26 : Les profils d'humidité dans le site M2	37
Figure 27 : Les profils d'humidité dans le site M3	37
Figure 28 : La répartition des sites des mesures des états de surface.	38
Figure 29 : Répartition des surfaces ouvertes et fermées.....	38
Figure 30 : Couverture du sol par la végétation sur le site EG1	39
Figure 31 : Pourcentage total de cailloux sur le site EG1	39
Figure 32 : Photos d'états de surfaces B62 et B63	40
Figure 33 : Les composantes des surfaces fermées.....	41
Figure 34 : Les composantes des surfaces couvertes	42
Figure 35 : Diagrammes GEPPA des textures (1963)	43
Figure 36 : Zonation texturale de la zone d'étude : éléments fins	44
Figure 37 : Zonation texturale de la zone d'étude : éléments grossiers	44
Figure 38 : Ks en fonction de la granulométrie	45
Figure 39 : Ks en fonction du % argile ou sable grossier	45

Liste des tableaux

Tableau 1 : les paramètres hydrodynamiques du sol des sites Beerkan.....	29
Tableau 2 : Données statistiques des paramètres mesurés	29
Tableau 3 : Les classes de Ks (<i>in</i> Chamayou et Legros 1989).....	30
Tableau 4 : Détermination du Ks (mm/s) par méthode Müntz	33
Tableau 5 : Valeurs de Ks retenues pour l'expérimentation Müntz.....	36

Introduction

L'érosion du sol est un phénomène ancien. Il modèle les paysages depuis les temps géologiques les plus anciens. Les précipitations et le ruissellement sont les premières causes de ce phénomène naturel sous la plupart des climats tempérés ou tropicaux. Dans les climats extrêmes, désertiques ou polaires, le vent et le gel sont aussi d'importants facteurs de l'érosion (Roose, 1999).

L'érosion des sols et ses conséquences représentent un des enjeux environnementaux actuels majeurs (CCE, 2002 <http://europa.eu.int/comm/environment>). Outre la perte du capital sol et les dégâts directs causés sur les terres agricoles, les dommages entraînés comprennent la pollution des points de captage des eaux potables, l'eutrophisation des cours d'eau et l'inondation des zones urbanisées en aval du territoire agricole sous la forme de coulées boueuses, l'envasement des barrages et la perte d'infrastructures de mobilisation des eaux de surfaces (Albergel et al, 2003).

Par ailleurs, on observe une sensibilité grandissante des organisations gouvernementales et du public aux effets néfastes, directs ou indirects, de l'érosion des sols qui s'explique par l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des événements érosifs. En dehors de l'aléa climatique, qui a toujours été présent, cette évolution a deux causes principales :

- Les bouleversements qui se sont produits ces quarante dernières années en termes d'occupation du sol, notamment au travers de l'intensification de l'agriculture (suppression des éléments structurant le paysage, retournement des prairies, agrandissement des parcelles...) qui entraîne une augmentation du risque érosif et une accélération des taux d'érosion par un facteur allant de 10 à 100 (Meade et al, 1990).
- L'augmentation de la sensibilité et de la vulnérabilité aux phénomènes érosifs avec l'accroissement de l'urbanisation en aval des terres cultivées (Auzet, 1987; Le Bissonnais et al, 1998).
- La désertification des sols avec la surexploitation et le surpâturage dans les régions arides et semi arides du monde. (Floret et Pontanier, 1982)

C'est dans ce cadre de l'augmentation des pertes en terres agricoles par érosion que le ministère de l'agriculture tunisien a défini depuis les débuts des années 1960 une politique ambitieuse pour contenir ce fléau, restaurer des terres et protéger les ressources naturelles.

Ainsi 900 000 ha des terres agricoles ont été aménagés avec des banquettes en courbes de niveau (Nasri, 2002) entre autres aménagements de conservation des eaux et des sols. Ce type d'aménagement réalisé mécaniquement apparaît comme le plus répandu dans différents pays des zones semi arides de la planète. Les autres types d'ouvrages de conservation des eaux et des sols réalisés en Tunisie sont des lacs et barrages collinaires, des rectifications de ravins et des reboisements ou revégétalisation suivant diverses techniques de l'agro-foresterie.

Dans les massifs montagneux de Tunisie Centrale, de nombreuses têtes de bassins ont reçu un aménagement intégré, comprenant un petit barrage à l'exutoire, des rectifications de ravins dans le réseau hydrographique, des reboisements sur les

sommets avec des aménagements forestiers quand cela est nécessaire et des aménagements en banquettes placées suivant les courbes de niveaux sur les terres agricoles.

C'est à l'un de ces petits bassins montagneux que nous nous sommes intéressés et plus particulièrement à celui de El Gouazine, petit affluent de l'oued El Ajela (bassin versant du Nebhana) dans le Gouvernorat de Kairouan au pied du Jbel Serj. Le bassin versant d'une superficie de 16,64 km² a été aménagé au cours des années 1990 : (i) à son exutoire se trouve un petit barrage de 250 000 m³ ; (ii) de nombreux reboisements sont présents et 46% de sa superficie ont été aménagés en banquettes anti-érosives.

Cette zone d'étude est caractérisée par des précipitations limitées et irrégulières (400 mm de pluviosité interannuelle), elles sont de régime méditerranéen. Violentes et de courte durée, elles provoquent une forte érosion du sol. L'aménagement en banquettes de courbes de niveau a pour objectif la réduction de l'effet érosif des pluies et l'amélioration du captage de l'eau par le sol. Ce dernier dépend des propriétés physiques du sol qui contrôlent le transfert de l'eau.

Sur ce bassin deux sites de banquettes ont été choisis pour une étude du fonctionnement hydrologique de l'aménagement. Il est prévu de calibrer et valider sur ces sites un modèle à base physique du ruissellement et de l'érosion. Le premier site correspond à des terres de céréaliculture sable argileux, le second sur un lithosol peu profond et caillouteux correspond plutôt à des terres de parcours mais qui sont mises en culture certaines années.

Le modèle qui sera mis en œuvre est celui décrit par Sharda et Sharma (2002). Dans le cadre de notre travail de DEA nous avons pris comme objectif de caractériser les paramètres conditionnant l'infiltration dans un espace inter-banquette et leur variation spatiale. **Ce travail de DEA a donc comporté trois phases :**

1. Une phase de recherche bibliographique et d'apprentissage des techniques d'infiltrométrie au laboratoire LISAH de Montpellier (Laboratoire d'étude des Interaction entre le Sol, l'Agrosystème et l'Hydrosystème – UMR ENSA.M INRA IRD) du 10/02/2003 au 06/04/2003.
2. Un travail de terrain en Tunisie où les expérimentations d'infiltrométrie ont été réalisées avec le concours du LISAH en Tunisie et de l'INRGREF (Institut National de la recherche en Génie Rural et Eaux et Forêts). du 07/04/2003 au 26/04/2003.
3. Une phase de dépouillement, interprétation des données et rédaction du rapport du 27/04/2003 à fin Septembre 2003

Ce mémoire est constitué de trois parties :

- Dans une première partie le bassin versant d'El Gouazine est présenté à partir des données et des documents cartographiques obtenus en première phase de ce travail. Le site de banquettes sur lequel nous avons réalisé les expérimentations est présenté ainsi que les travaux antérieurs qui ont été réalisés.
- La seconde partie est consacrée à la présentation des méthodes. Nous décrivons d'abord le modèle qui devra être appliqué et montrons pourquoi

une première phase consiste à déterminer les paramètres hydrophysiques des sols et leur variabilité spatiale. Ensuite nous expliquons les méthodes d'infiltrométrie utilisée : Méthode « Beerkan » (Haverkamp et al, 1999) et Méthode Müntz (*in* Boivin et al, 1987). Nous terminons cette partie par la méthode de caractérisation des états de surface du sol. En effet nous pensions relier les caractéristiques hydrophysiques aux « états de surface ».

- La troisième partie comprend les résultats de notre expérimentation. Une cartographie de la conductivité hydraulique à saturation obtenue par la méthode Beerkan et une comparaison de résultats donnés par celle du Müntz sont présentés et discutés. La cartographie de la conductivité hydraulique à saturation est comparée aux états de surface, aux textures des sols. Un modèle numérique de terrain de la zone étudiée est proposé en vue d'établir le modèle de propagation du ruissellement.

En conclusion, nous terminons par une discussion sur notre travail et sur ce qui pourrait être envisagé pour arriver à l'application du modèle d'érosion.

Partie 1 : Présentation du site d'étude : Le bassin versant d'El Gouazine

1.1 Le bassin versant : Localisation et caractérisations éco-géographiques

Le bassin versant d'El Gouazine a une superficie de 16.66 km². Il se situe à 15 km de la délégation d'Oueslatia, dans le gouvernorat de Kairouan au centre de la Tunisie (figure 1). Il appartient au bassin versant de l'oued Nehbana qui reçoit en rive droite l'oued El Ajela dans lequel se jette l'oued El Gouazine.



Figure 1 : Localisation du bassin versant d'El Gouazine (in Mansouri, 2001)

(à partir de la carte au 1/50 000^{ème})

Ce bassin versant est orienté sud-nord et a une forme allongée, sa longueur est de 10 km et sa largeur varie de 1,5 km à 3 km. Son exutoire occupe les coordonnées géographiques suivantes : 35°54'30" de Latitude Nord et 9°42'13" de Longitude Est.

L'altitude du bassin est comprise entre 575 m au sud et 375 m au nord, à son exutoire. La pente moyenne longitudinale de ce bassin, très allongé, est de 1.8 %. Sa pente transversale, nettement plus élevée que la pente longitudinale, dépasse 5 %. Les formations géologiques sont caractérisées par la présence d'un substratum marno-calcaire dans la partie sud-est du bassin versant et d'un substratum argilo-gréseux dans la partie nord-ouest (Nasri, 2002).

Le climat est méditerranéen semi aride. Les pluies annuelles sont très irrégulières et très variables dans le temps et dans l'espace. Les averses correspondent à des orages violents de courte durée ne dépassant en général pas l'heure. Ils sont aussi caractérisés par de fortes intensités dépassant souvent 100 mm/h en 5 minutes. La pluie moyenne observée sur le site (1994 – 2002) est 390 mm pour 375 mm à la station de référence d'Oueslatia. Les températures sont chaudes et sèches (dépassant les 45 °C) en été et fraîches voire froides l'hiver. On compte une dizaine de journées de gelée. Les vents sont forts de régime Nord Ouest en Hiver – Printemps. Ils sont de Sud Est l'été (Shergui ou Sirocco). L'évapotranspiration potentielle est forte, on mesure une évapotranspiration sur bac de 1900mm annuel (ACTA-IRD, 2002)

D'un point de vue géologique, le bassin versant appartient au synclinal d'Oueslatia. Il présente une forte hétérogénéité géomorphologique avec des massifs montagneux et des encroûtements calcaires. Dans la vallée les terrasses alluviales sont des dépôts quaternaires grossiers reposant sur des marnes à minces intercalations calcaires datant du Lutétien Bartonien. Des bancs de calcaires lumachelliques affleurent sur les versants. Les sommets, en rive gauche, sont constitués de grès attribués à l'Oligocène (figure 2).

Les sols résultants de cette géologie sont de trois types. Les interfluvés présentent des sols calcimagnésiques à encroûtement calcaire plus ou moins induré ; tandis que les vallées présentent des sols peu évolués. Dans les parties aval, les sols alluviaux profonds sable argileux alternent avec des sols calcimagnésiques. (Zante et Mansouri, 1999 *in* Mansouri, 2001), (figure 3).

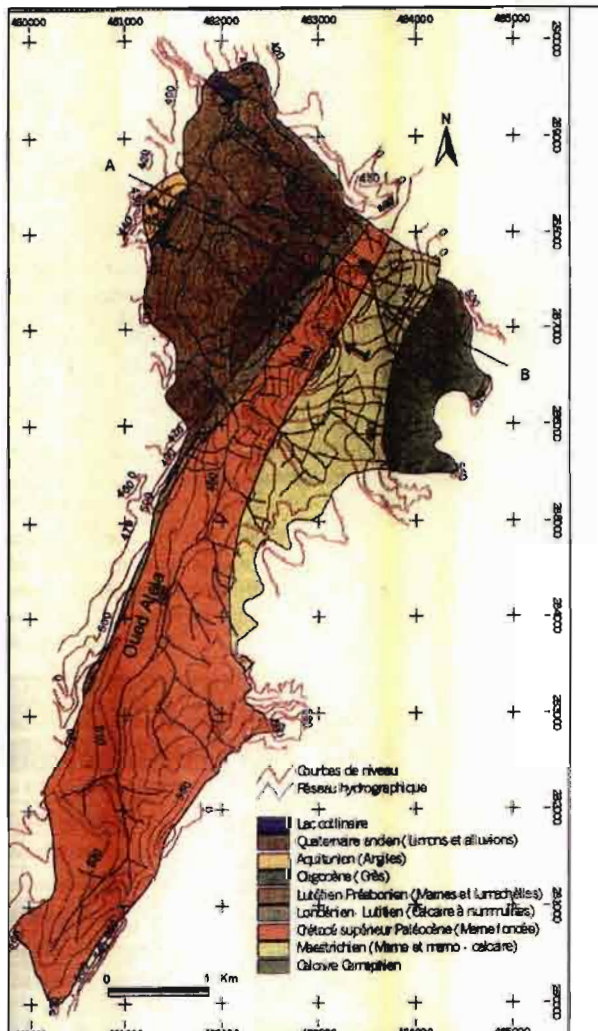


Figure 2 : Carte géologique du B.V. d'El Gouazine (*in* Mansouri 2001)

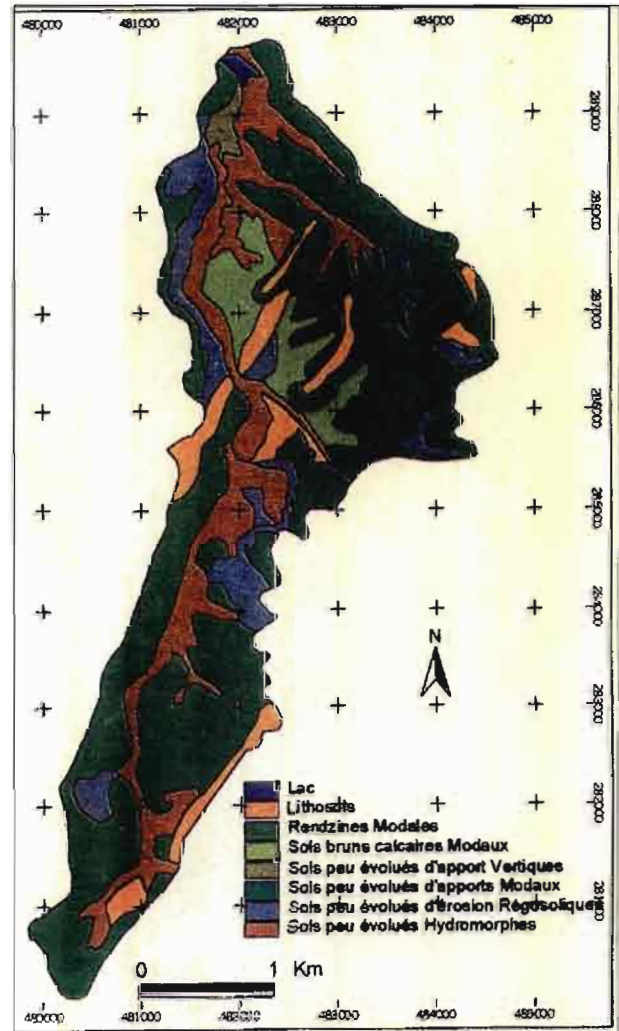


Figure 3 : Carte pédologique du B.V. d'El Gouazine (*in* Mansouri 2001)

La plus grande partie de sa surface est occupée par des terres agricoles, elles représentent 55 % du bassin versant et sont presque entièrement traitées par des banquettes en courbe de niveau. Le reste du bassin est semi forestier avec des reboisements en pin d'Alep (figure 4).

La végétation naturelle est représentée par de l'alfa (*Stipa tenacissima*), du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et des caroubiers isolés (*Ceratonia siliqua*). Sont également présentes différentes espèces de type méditerranéen : *Rosmarinus officinalis*, *Erica multiflora*, *Geniste cinens*, *Phyllarea augustifolia*, *Cistus selvifolius*, *Globularia alypum*, *Cistus libanotis*, *Artemesia herba alba*, *Ballota hissuta*...

Dans les parties cultivées on trouve essentiellement des cultures céréalières, des plantations d'oliviers et d'amandiers, et des terres de parcours. Zante et Mansouri (*in* Mansouri 2001) donnent la répartition suivantes : 40% de terres cultivées ou en jachère, 16.7% de forêts denses ou claires, 10.7% de parcelles d'alfa, 9.3% de terres de parcours, 8% de garrigues et 4,7% de vergers.

A l'exutoire a été construit un barrage en terre compactée en 1990. Une digue de 232 m de long et de 10,63 m de haut est équipée d'un déversoir latéral en rive gauche en béton et de forme trapézoïdale. Sa cote par rapport au fond du barrage (zéro de l'échelle de crue) est à 8,28m. Il en résulte un lac d'une dizaine d'hectares à la cote de déversement et d'une capacité de 237 000 m³ en date de la première mise en eau (Mansouri 2001).

1.2 Les sites de banquettes

Pour ne pas perdre les terres agricoles et pour protéger le lac collinaire construit à l'exutoire du bassin d'un envasement rapide, le bassin versant d'El Gouazine a été aménagé en banquettes à rétention quasi totale entre juillet 1996 et juillet 1997. La longueur moyenne des banquettes est d'environ 100 m pour une hauteur moyenne de 1.50 m (figure 5).

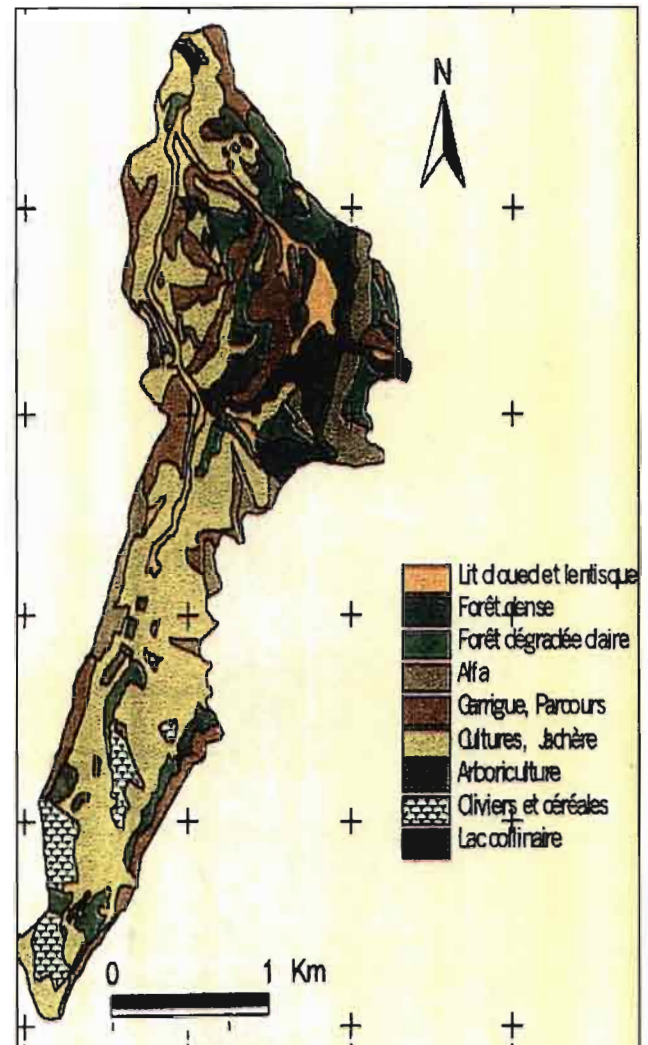


Figure 4 : Carte d'occupation des sols du B.V.d'EL Gouazine (*in* Mansouri 2001)

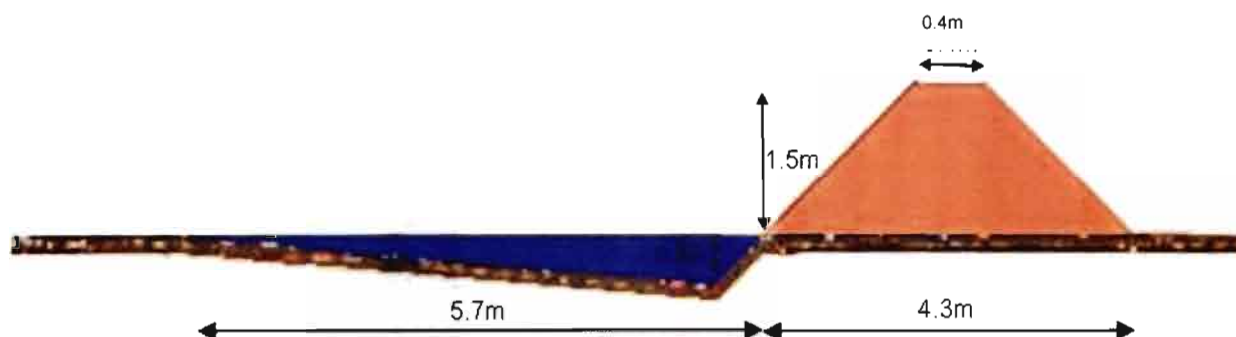


Figure 5 : Schéma de section de la banquette

L'écartement moyen entre les banquettes est de 25 m .La superficie aménagée sur le bassin versant est de 783 hectares, soit 43% de sa superficie.

Ces banquettes sont construites mécaniquement sur toutes les terres agricoles du bassin d'El Gouazine dont la pente est inférieure à 25% et sur toutes les terres non marneuses. Elles se composent d'un canal limité en aval par une butte ou bourrelet (figure 6). Elles retiennent les eaux de ruissellement de l'espace inter banquette.



Figure 6 : Banquettes du site EG1 après une pluie (ph. Nasri 2002)

Les quantités de pluie qui tombent sur le versant sont interceptées par ces banquettes. L'eau s'accumule derrière chaque banquette et peut déborder latéralement vers l'aval soit dans une ravine soit vers une autre banquette lorsque celle ci est installée en quinconce.

A l'échelle du bassin versant, Nasri (2002) démontre une importante réduction des coefficients de ruissellement. Les pluies supérieures à 20 mm qui avaient des coefficients de ruissellement de 4 à 30 % avant l'aménagement n'ont plus que des coefficients de ruissellement variant de 1 à 9%. Au niveau annuel, l'écoulement a tellement baissé qu'il n'assure plus un remplissage optimal du barrage en année sèche.

Du point de vue de l'érosion, les suivis par bathymétrie de l'envasement du barrage montrent une réduction spectaculaire des transports solides (figure 7).

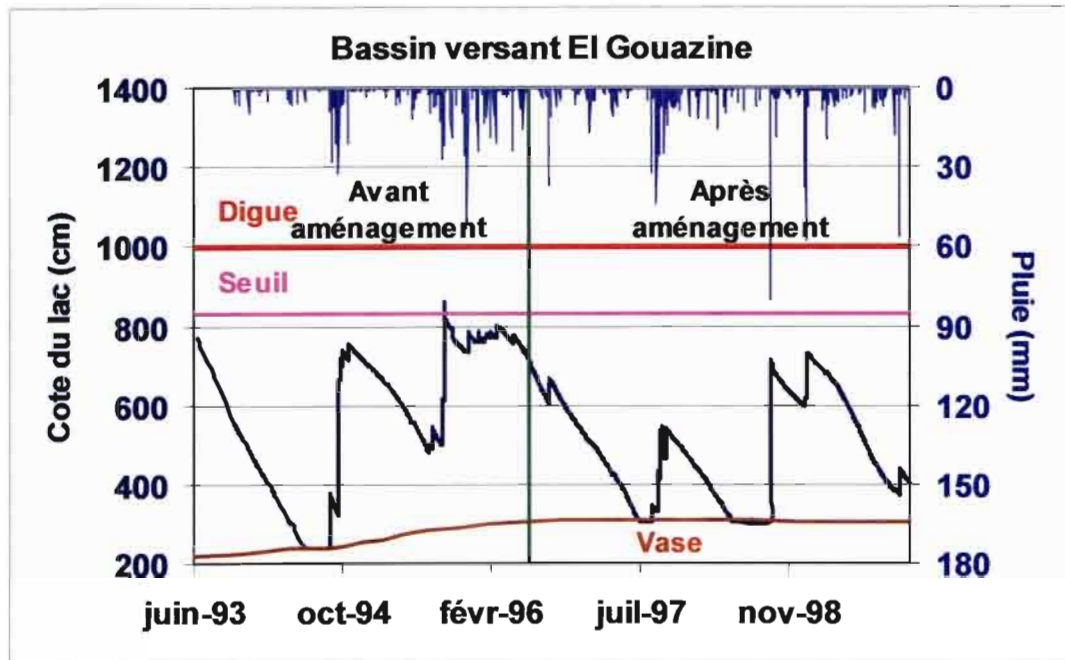


Figure 7 : Evolution de la sédimentation du barrage

(On remarque une diminution sensible de l'envasement comme du remplissage en eau du barrage après l'aménagement (*in* Mansouri 2001).).

Deux sites de mesures ont été aménagés dans le bassin versant pour un suivi fin du fonctionnement hydrologique des aménagements en banquettes : El Gouazine I sur sols bruns calcaires relativement épais dans la partie aval du bassin versant, El Gouazine II sur sols peu évolués et rendzines sur calcaires dans la partie amont. La carte de la figure 8 montre les emplacements de ces deux sites. Tous deux sont aménagés en banquettes de terre de quelque 1,5 m de hauteur, au tracé isohypse et à espacement variant avec la pente topographique de 30 m à 100m.

C'est sur le site 1 où les sols sont le mieux représentés que nous avons effectué notre expérimentation.

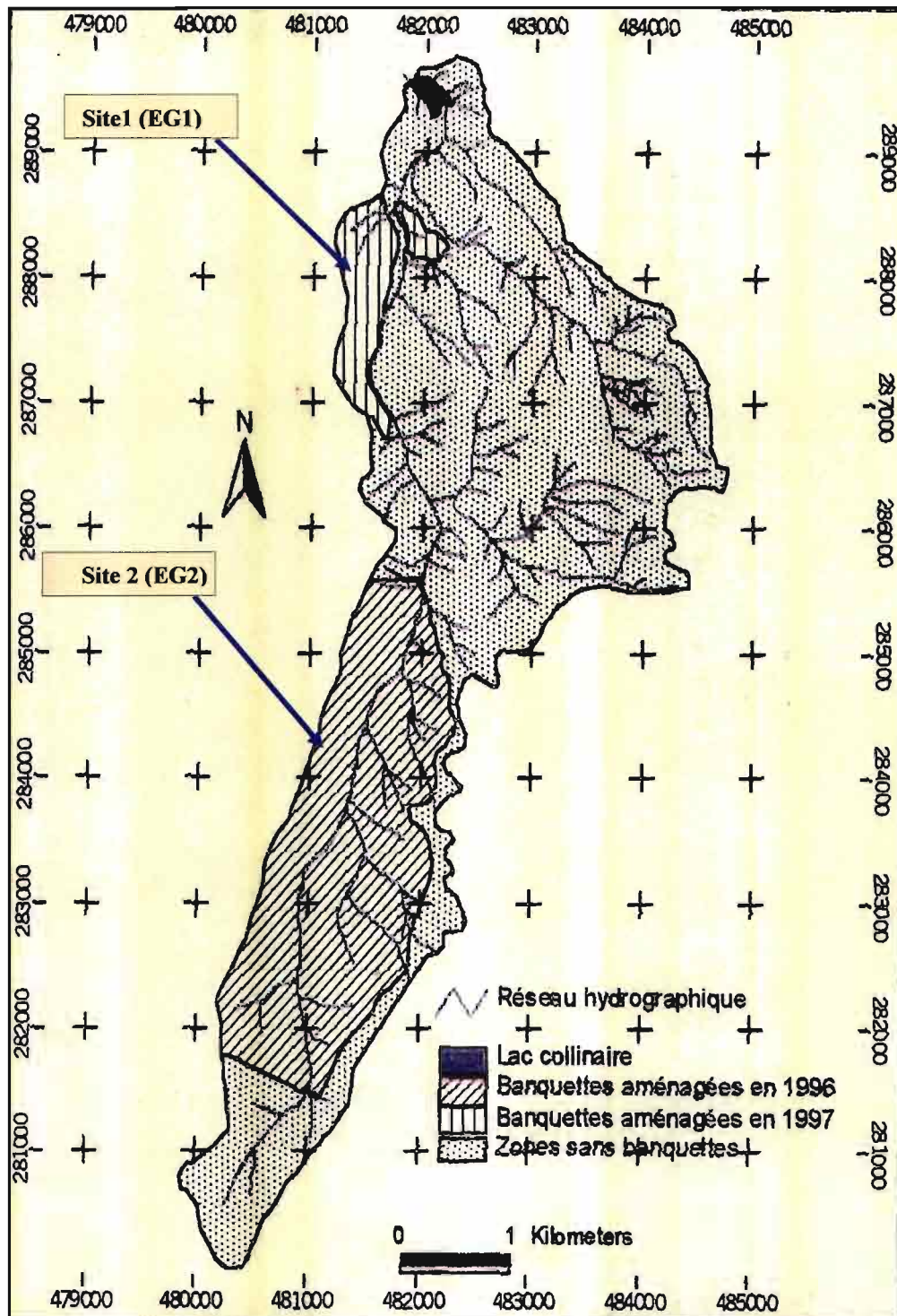


Figure 8 : carte de situation des travaux en banquette- Sites d'étude.

1.3 Site de banquettes El Gouazine 1 (EG1)

Ce site a une surface de 0.8 ha, il se trouve en amont du barrage en rive gauche sur le bord de la route avant d'arriver au rond point des routes de Ousseltia, Kairouan. La figure 9 montre ce site au moyen d'un modèle numérique de terrain (réalisé par J. Collinet). Cette figure comme l'ensemble des représentations spatiales du site EG1 sont réalisés avec le logiciel SURFER www.goldensoftware.com/products/surfer/surfer.shtml.

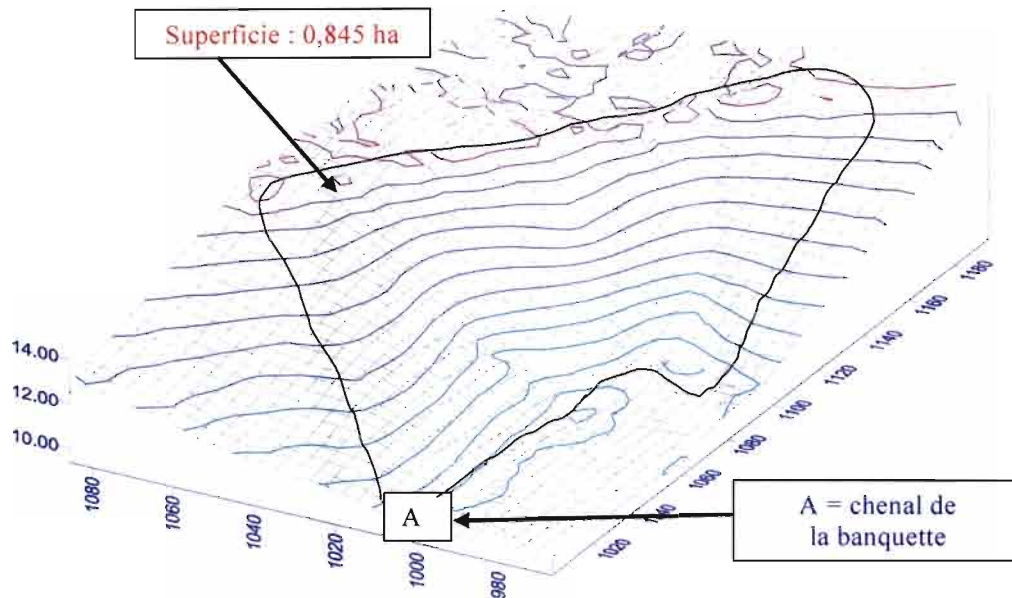


Figure 9 : Modèle numérique de terrain du bassin inter-banquette EG1

(Collinet et Zante, com. perso.)

On distingue un espace inter banquette qui est un micro bassin versant fermé en aval par un canal collecteur et une banquette qui ne peut déverser que par ses extrémités ou lors de très fortes pluies en se rompant comme lors des pluies du 23/09/1998 et du 19/01/1999 (Figure 10).

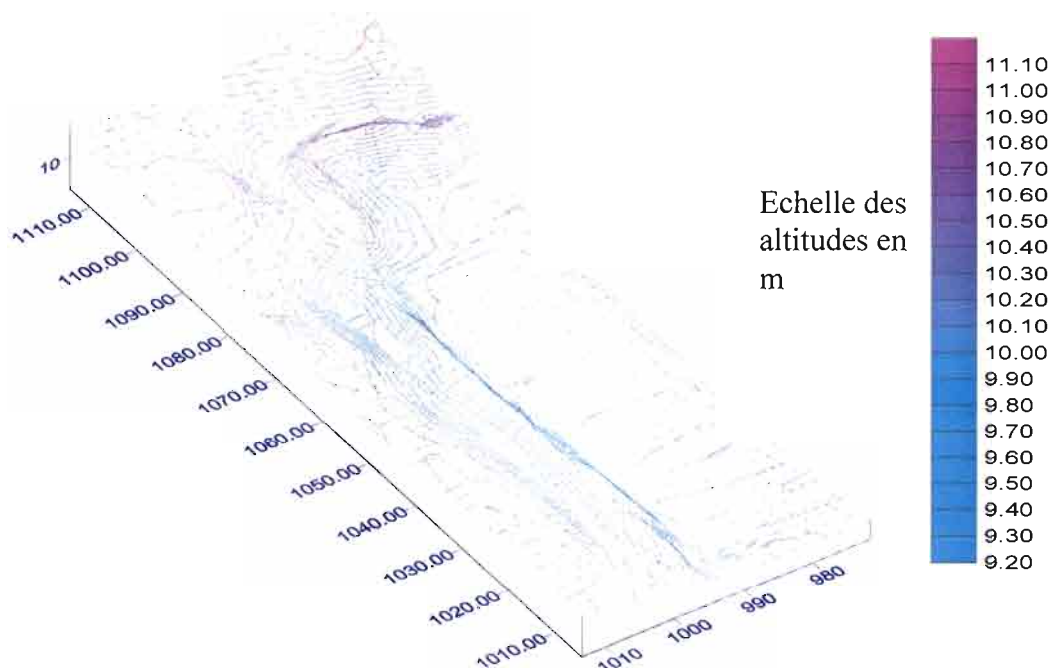


Figure 10 : Site EL GOUAZINE I, détail de la banquette de terre

(Collinet et Zante, com. perso.)

Ce site (EG1) a été aménagé en 1997 : un pluviographe automatique enregistre les hauteurs de pluie et leurs intensités. Il s'agit d'un pluviographe Cédipe commercialisé par la société IESM SERPE dont la bague réceptrice a une surface de 400 cm². Chaque basculement d'auget se fait pour une quantité de pluie recueillie de 0.5 mm et est enregistré sur une base de temps précise au 1/10 de seconde par un contact électrique au mercure.

Trois sites de mesures de l'humidité du sol par TDR (Time Domain Reflectometry) sont installés un en amont de la banquette et deux en aval aux profondeurs suivantes : 30 cm, 45 cm et 80 cm. Un site de mesure des pressions de l'eau dans le sol est également équipé. Ces sites permettent le suivi de l'humidité et des pressions dans le sol et d'avoir notamment le profil initial de l'humidité qui constitue une des principales données d'entrée des modèles d'infiltration dans la zone non saturée. La figure 11 montre les variations au cours de la période 1998-2000 des pluies et de l'humidité des sols.

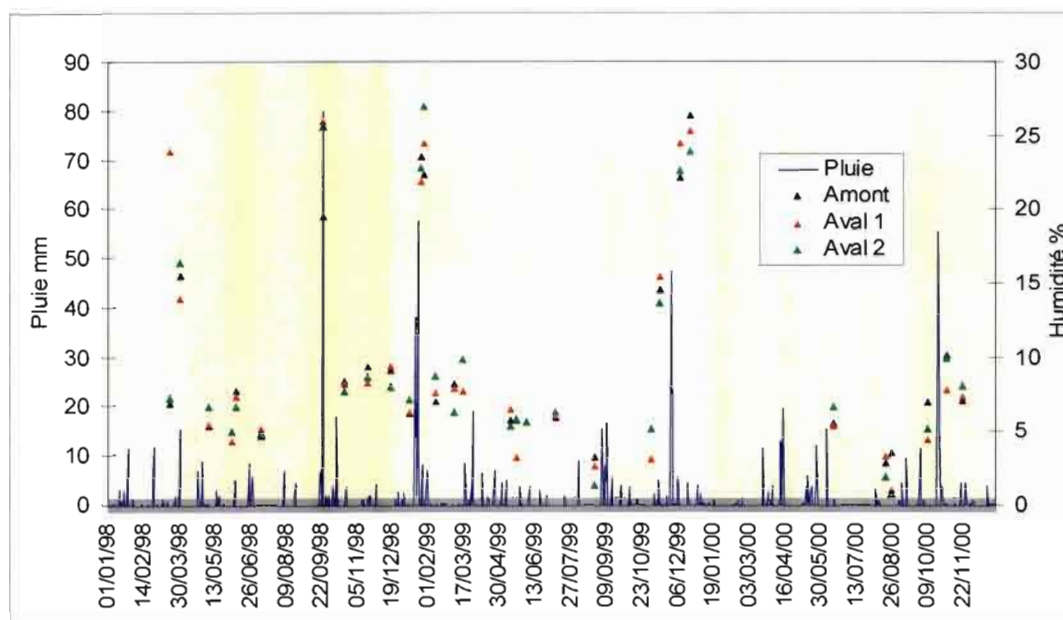


Figure 11 : Variations d'humidité en surface de l'inter-banquette
(Collinet et Zante, in HYDROMED 2001)

On remarquera que les valeurs d'humidité décroissent rapidement après les pluies et se stabilisent en période pluvieuse autour de 25% et en été entre 10 à 15%.

Pour la mesure de l'érosion, la méthode consiste à considérer la surface inter-banquette comme une vaste parcelle de ruissellement et d'érosion, la collecte des eaux et des terres mobilisées dans le champ s'opérant au niveau du chenal de la banquette aval. On effectue à différentes périodes de l'année des nivellements précis (tachéomètre laser) dans différents profils en travers positionnés dans le chenal de la banquette. La comparaison des profils nivelés génère des sections représentant des pertes (abrasion du chenal) ou des gains en terre (sédimentation de terres érodées), l'extension latérale de cette information fournit des volumes de terres mobilisées, puis des masses à partir de la mesure de masse volumique. Ainsi l'érosion en nappe d'une jachère, emblavée l'année 1997-1998, fut de 6,06 t.ha⁻¹.an (Collinet et Zante, in HYDROMED 2001). Ces données en masse doivent permettre de calibrer et de valider le modèle d'érosion.

Partie 2 : Méthodologie

2.1 Présentation du modèle projeté pour simuler l'écoulement et l'érosion

Le modèle qu'il est escompté d'utiliser a été développé en éléments finis par Sharda et Samra (2002) pour simuler l'écoulement et l'érosion des sols en zones agricoles aménagées en banquettes en courbes de niveaux dans les régions semi-arides de l'Inde. Il résout successivement les équations différentielles suivantes :

- l'équation de Richards, avec un terme puits pour tenir compte de l'extraction racinaire;
- l'équation de St Venant avec une approximation de l'onde cinématique, pour le ruissellement superficiel ;
- et une équation de la continuité sédimentaire.

Ce modèle permet de simuler l'infiltration et la dynamique de l'eau dans le sol sous culture, le ruissellement diffus et concentré, et l'érosion du sol.

Selon Sharda et Samra (2002): Les valeurs simulées de perte de sol décrivent assez bien les observations dans un contexte de conservation par banquettes anti-érosives. Le modèle à éléments finis a été largement appliqué pour étudier le comportement hydrologique d'un tel système de conservation des sols. Le modèle estime raisonnablement l'écoulement et la perte de sol pour des conditions de pluie variées et pour des stades culturaux différents.

2.1.1 Production du ruissellement

La production en eau de ce modèle est réalisée à partir des quantités d'eau de pluie refusées par l'infiltration entre les banquettes. Les banquettes sont considérées comme à rétention totale ou à déversement latéral drainé en dehors des espaces cultivés.

L'écoulement de l'eau dans la zone non saturée des sols est décrit par la combinaison de l'équation de continuité (1) et de l'équation de Darcy généralisée au milieu non saturé (2) écrites dans la direction verticale.

$$\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \dots\dots\dots(1)$$

Cette équation traduit la conservation de la masse dans le sol ; la différence entre le flux d'entrée et le flux de sortie est égale à la variation de teneur en eau dans l'unité de volume considérée.

$$q = -k(\theta) \left(\frac{dh}{dz} - 1 \right) \dots\dots\dots(2)$$

Cette équation, qui lie le flux d'eau à la charge hydraulique dans le milieu poreux, est basée sur l'hypothèse d'un écoulement 1D.

Avec : q le flux d'eau, de dimension $(L.T^{-1})$, k la conductivité hydraulique, de dimension $(L.T^{-1})$, θ la teneur volumique en eau du sol $(L^3.L^{-3})$, z et h sont, respectivement la position selon un axe vertical orienté positivement vers le bas et la pression de l'eau au point considéré, exprimées en unité de longueur (L). t le temps (T).

La combinaison des deux équations, en substituant $C(\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial h}$ la capacité capillaire (1/L), conduit à l'équation (3) de Richards (1931) qui décrit l'écoulement de l'eau dans le sol :

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots (3)$$

L'intégration de cette équation sur z et t , après la connaissance des conditions initiales et aux limites, permet de déterminer le profil spatio-temporel de la teneur en eau $\theta(z, t)$.

Cette dernière équation est valable dans le cas de l'infiltration verticale unidimensionnelle. La détermination des paramètres de cette équation, *in situ*, nécessite la connaissance détaillée des caractéristiques du sol, ce qui est difficile à réaliser à grande échelle sur le terrain. Il faut d'une part procéder à des essais d'infiltration avec suivi des humidités du sol et des tensions de l'eau dans le sol. Il faut d'autre part connaître les surfaces sur lesquels les paramètres estimés localement s'appliquent.

2.1.2 Propagation du ruissellement

Les équations de Barré St Venant (1971) décrivent l'écoulement transitoire à surface libre. Il s'agit d'un système d'équations différentielles hyperboliques qui n'admet pas de solution analytique exacte. Pour le résoudre, des auteurs ont proposé des simplifications. Moussa (2003) reprend l'ensemble des travaux permettant de proposer des modèles simplifiés de transformation d'une onde amont en une onde aval avec éventuellement des apports intermédiaires.

Le phénomène de propagation de l'eau dans des canaux à surface libre ou sur des surfaces à la pression atmosphérique est régi par les deux équations de la mécanique des milieux continus : la conservation de la matière, équation (4), et la conservation de la quantité de mouvement, équation (5). Les hypothèses de base supposent un écoulement monodirectionnel, une distribution hydrostatique des pressions et l'absence d'apports ou de pertes latéraux, (*in* Moussa, 2003).

$$\frac{\partial y}{\partial t} + y \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} + g(S_f - S) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

Où :

g : accélération de la pesanteur (LT^{-2}) ;

S : pente du fond du canal en x (LL^{-1}) ;

S_f : pente de la ligne de charge en x à l'instant t (LL^{-1}) ;

t : temps (T) ;

V : vitesse moyenne en x à l'instant t (LT^{-1}) ;

x : abscisse (L) ;

y : profondeur d'eau en x à l'instant t , comptée à partir du fond (L)

Les équations de Saint-Venant dépendent des conditions aux limites amont et

aval du cours de l'eau, des conditions initiales à $t=0$ et de ses caractéristiques géométriques, la longueur, la pente et la rugosité. En fonction de ces grandeurs, certains termes des équations de Saint-Venant peuvent être négligés, conduisant à une forme plus simplifiée de l'équation de propagation d'onde (Moussa, 2003).

Lors du ruissellement sur une surface, les termes d'accélération dans l'équation de conservation de quantité de mouvement du système de Saint-Venant peuvent être négligés. On obtient le modèle de l'onde diffusante qui est une équation parabolique aux dérivées partielles de second ordre.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \left(\frac{Q}{\partial x} - q \right) - D \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - \frac{\partial q}{\partial x} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

Avec :

- C : célérité de l'onde fonction du débit Q (LT^{-1}) ;
- D : diffusivité de l'onde fonction du débit Q (L^2T^{-1}) ;
- $Q(x, t)$: débit à l'abscisse x à l'instant t (L^3T^{-1}) ;
- $q(x, t)$: débits latéraux (apports si $q > 0$ et pertes si $q < 0$) par unité de longueur (L^2T^{-1})
- t : temps (T) ;
- x : abscisse le long du cours de l'eau (L).

Dans le cas particulier où la diffusivité D est nulle, le modèle de l'onde diffusante se réduit au modèle de l'onde cinématique. La précision de l'approximation du modèle de l'onde cinématique et du modèle de l'onde diffusante en comparaison au modèle de l'onde dynamique a été largement analysée et utilisée pour la propagation du ruissellement, (Moussa, 2003).

2.1.3 Production et transfert des matières solides

Ce modèle donne l'équation de la continuité sédimentaire unidimensionnelle décrivant le processus d'érosion des terres comme :

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \rho_s \frac{\partial (C_s y)}{\partial t} = D_1 + D_R = D_L \quad \dots\dots\dots(7)$$

- Q_s : est la décharge des sédiments ($M.L^{-1}.T^{-1}$).
- ρ_s : est la densité massive des particules de sédiments ($M.L^{-3}$).
- C_s : est la concentration de sédiments dans le flux ($L^3.L^{-3}$).
- y : est la profondeur de flux (L).
- D_1 : est le taux de livraison des sédiments de secteurs entre-ravines ($M.L^{-2}.T^{-1}$).
- D_R : est le taux d'érosion en ravines ($M.L^{-2}.T^{-1}$).
- D_L : est le taux d'afflux latéral des sédiments par unité de longueur par unité de largeur de régime de flux ($M.L^{-2}.T^{-1}$).
- x : est la distance dans la direction du flux (L)
- t : est le temps (T).

En conditions instables, en substituant $Q_s = \rho_s \cdot C_s \cdot Q$ et $Q = V \cdot y$

En prenant $Q_s/V=A_s$, on peut écrire l'équation comme :

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \frac{\partial A_s}{\partial t} = D_1 + D_R \dots\dots\dots(8)$$

Où :

Q : est la décharge par unité de largeur ($L^3.L^{-1}.T^{-1}$).

V : est la vitesse de flux ($L.T^{-1}$).

A_s : est la masse de sédiments dans le mouvement par unité de surface ($M.L^{-2}$)

La décharge et la vitesse de flux sont obtenues à partir de la solution des équations de Saint Venant en conjonction avec une approximation de l'onde cinématique et l'expression de la friction de la pente selon la loi de résistance de Manning (Sharda et Samra, 2002)

2.1.4 Conclusion

Dans notre travail, on s'est principalement intéressé aux données d'entrée nécessaires aux premières équations de ce modèle concernant la production d'eau. En effet, pour simuler la dynamique de l'infiltration de l'eau dans le sol, il est indispensable de connaître les caractéristiques hydriques du sol. Celles-ci sont représentées par la courbe de rétention et la courbe de conductivité hydrique. La première décrit la variation de l'humidité du sol avec la pression de l'eau dans le sol, alors que la seconde tient compte de la variation de la conductivité du sol avec son humidité.

Ces relations peuvent être déterminées par le suivi de la dynamique de redistribution de l'humidité et des pressions dans le profil de sol préalablement humidifié par apport d'eau à la surface. Cependant, cette méthode présente plusieurs inconvénients : elle est assez lourde à mettre en œuvre, puisqu'il faut instrumenter le site de mesure d'appareils adéquats pour mesurer l'humidité et la pression du sol à différentes profondeurs; elle est longue et coûteuse, puisqu'il faut acquérir les données pendant plusieurs jours, voire plusieurs semaines. De plus, et vu sa lourdeur, il est difficile d'instrumenter plusieurs sites afin d'appréhender la variabilité des caractéristiques à l'échelle de l'aménagement.

Ceci a favorisé la mise au point de méthodes alternatives, plus simples à mettre en œuvre, plus rapides et moins coûteuses. Parmi ces dernières, nous avons choisi d'appliquer la méthode « Beerkan » qui est plus simple. Nous avons réalisé aussi quelques essais "Müntz" pour comparer les résultats d'application des deux méthodes. Nous avons donc cherché à déterminer les paramètres et les relations nécessaires à la première équation du modèle de Sharda et Samra (2002), à savoir celles nécessaires pour la résolution de l'infiltration de Richards.

2.2 Mesures de l'infiltration

2.2.1 Méthode Beerkan

Cette méthode (Haverkamp et al, 1999) permet de déterminer les propriétés hydrodynamiques d'un sol (courbe de rétention et courbe de conductivité) en conditions naturelles dans le cas de l'infiltration 3D, en utilisant des mesures simples et facilement accessibles sur le terrain.

Elle suppose que la courbe de rétention d'un sol est bien décrite par une fonction proposée par Van Genuchten (1980) (*in* De Condappa, 2002) de la forme suivante :

$$\theta = \frac{\theta_s}{\left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^m} \dots\dots\dots(9)$$

Où : θ est l'humidité du sol correspondant à la pression h , θ_s est l'humidité à saturation, h_g , n et m sont des paramètres reliés par ;

$$m = 1 - \frac{2}{n} \dots\dots\dots(10)$$

Quant à la courbe de conductivité, elle est de la forme proposée par Brooks et Corey (1964) (*in* De Condappa 2002);

$$K = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta \dots\dots\dots(11)$$

Où : K est la conductivité correspondante à l'humidité θ , K_s est la conductivité à saturation et η est un paramètre de forme.

La méthode Beerkan suppose que l'on peut accéder aux valeurs m ou n et η à partir de la courbe granulométrique du sol et de sa porosité et que θ_s est facilement accessible par la mesure directe.

La détermination des deux paramètres restants : h_g et K_s est possible en ajustant une expression théorique d'une infiltration axisymétrique (Haverkamp *et al*, 1994) sur une courbe d'infiltration expérimentale.

La méthodologie expérimentale consiste donc en un prélèvement de sol et en un essai d'infiltration. L'échantillon prélevé est utilisé pour déterminer (i) la granulométrie de l'horizon de surface, (ii) son humidité initiale et (iii) sa densité apparente afin d'estimer la porosité.

Quant à l'essai de l'infiltration, il est effectué par apport d'eau à la surface dans un petit cylindre métallique, (diamètre \approx 15 cm), légèrement enfoncé dans le sol, (1 à 2 cm). L'infiltration se fait par apports de volumes constants à la surface à plusieurs reprises dès que l'épaisseur de la lame à la surface du sol atteint un niveau fixé à l'avance (1 à 2 mm). L'expérimentation se poursuit en chronométrant le temps entre les apports successifs. Lorsque le temps entre deux apports successifs devient statistiquement constant (peu de différence sur trois mesures, moins de 5 secondes) on arrête la manipulation.

On arrive donc à calculer l'infiltration cumulée en fonction du temps. A la fin de l'expérimentation, le prélèvement d'un échantillon dans le cylindre d'infiltration permet de déterminer l'humidité saturée du sol.

Les informations nécessaires à cette méthode sont donc :

1. La courbe granulométrique du sol ;
2. L'humidité initiale (θ_i) et à saturation (θ_s) du sol ;
3. La densité apparente du sol ;
4. Le rayon du cylindre ;
5. La lame infiltrée en fonction du temps.

Un programme sur le logiciel MATHCAD (<http://www.mathcad.com>), BEST 2, développé au LTHE de Grenoble et disponible au LISAH a été utilisé pour dépouiller ces expérimentations et pour déterminer les paramètres hydrodynamiques du sol. L'annexe 1 illustre pour un des sites la méthode numérique utilisée.

2.2.2 Méthode Müntz

Cette méthode permet de mesurer uniquement l'infiltration verticale. Elle consiste à mesurer la lame infiltrée sous une charge constante dans l'anneau intérieur de deux anneaux cylindriques concentriques enfoncés dans le sol de quelques cm (de l'ordre de 10 cm). La lame est maintenue constante dans les deux anneaux par un système de vase de Mariotte. Les rayons des anneaux ne sont pas standardisés, mais leur rapport est de l'ordre 1/2. Le maintien d'une charge identique dans les deux anneaux, permet d'assimiler l'écoulement dans l'anneau intérieur à une infiltration verticale, en supposant que l'anneau extérieur fournit à lui seul la part latérale de l'écoulement.

Cette mesure nous permet d'appliquer le modèle de Philip (1957) et/ou le modèle de Green-Ampt (1911) (*in* Boivin *et al*, 1987) pour calculer respectivement la sorptivité et la conductivité hydrique à saturation.

2.2.2.1 Le modèle de Philip

En 1957, Philip a présenté une solution analytique de l'équation de transport dans le cas monodimensionnel vertical, lorsque le sol est homogène, l'humidité initiale est constante sur toute la profondeur et l'infiltration a lieu sous une lame d'eau d'épaisseur négligeable à la surface. La solution est une série infinie en puissance $1/2$ de temps. En se limitant aux deux premiers termes de cette série, on obtient la loi d'infiltration de Philip ;

$$I(t) = S\sqrt{t} + Bt \dots\dots\dots (12)$$

Où S est la sorptivité ($L.T^{-1/2}$), qui exprime la capacité plus ou moins grande que possède le sol à absorber l'eau par capillarité, et B est un paramètre ayant les dimensions d'une vitesse, qui est de l'ordre de $K_s/3$ à $2K_s/3$, K_s étant la conductivité du sol à saturation. La relation entre K_s et B n'est pas établie théoriquement. L'importance de la sorptivité est grande au début de l'infiltration, mais elle diminue au fur et à mesure que le sol s'humecte et que l'importance de la

gravité devient prépondérante. Les paramètres S et B sont calculés par la régression linéaire de I/\sqrt{t} sur \sqrt{t} (Boivin *et al*, 1987).

2.2.2.2 Le modèle de Green et Ampt

Green et Ampt (1911), ont proposé un modèle simplifié de l'infiltration verticale. Ce modèle suppose que celle-ci a lieu sous forme de piston (figure 12) : l'humidité initiale est constante entre la surface du sol et le front d'humectation et prend la valeur de la saturation. Au niveau du front la pression de l'eau est constante

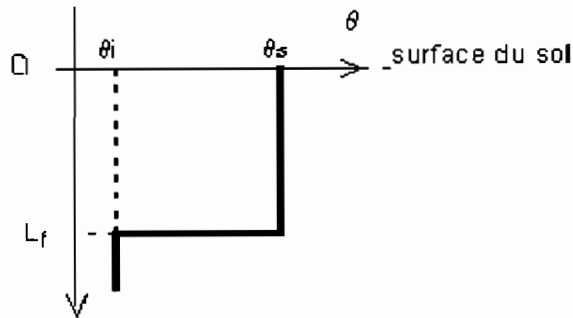


Figure 12 : la propagation du front d'humectation selon Green et Ampt

Avec ces hypothèses, la loi de Darcy, entre la surface et le front d'humectation s'écrit :

$$q = -k_s \frac{h_f - L_f - h_0}{L_f} \dots\dots\dots(13)$$

Où : q est la vitesse d'infiltration, k_s est la conductivité à saturation, h_f est la pression au niveau du front, qui se trouve à la profondeur L_f et h_0 est l'épaisseur de la lame à la surface du sol.

La forme piston du profil permet d'écrire :

$$I = (\theta_s - \theta_i) L_f \dots\dots\dots(14)$$

Où : I est la lame infiltrée et θ_i est l'humidité initiale. Par ailleurs, comme $q = \frac{dI}{dt}$ on peut écrire

$$\frac{dI}{dt} = -k_s \left[\frac{\Delta H \cdot \Delta \theta - I}{I} \right] \dots\dots\dots(15)$$

Où : $\Delta H = h_f - h_0$ et $\Delta \theta = (\theta_s - \theta_i)$

L'intégration de cette équation avec la condition : $I = 0$ à $t = 0$ donne

$$t = \frac{I}{k_s} - \frac{\Delta H \cdot \Delta \theta}{k_s} \ln \left(1 - \frac{I}{\Delta H \cdot \Delta \theta} \right) \dots\dots\dots (16)$$

Bien que cette équation donne le temps en fonction de la lame infiltrée et non l'inverse comme la loi d'infiltration de Philip présentée plus haut, il est possible d'effectuer un ajustement non linéaire sur les données expérimentales $I(t)$ afin d'accéder à la valeur de k_s . Nous avons effectué cet ajustement avec le logiciel Excel (www.microsoft.com/office/excel) en utilisant la fonction Solver qui permet une résolution par optimisation du système d'équation obtenu.

2.3 Caractérisation des états de surface du sol

2.3.1 Les types d'états de surface

La surface du sol et sa couverture plus ou moins dense sont les premiers obstacles interceptant les gouttes de pluie et sont, pour une intensité de pluie donnée, à l'origine de la répartition des précipitations entre infiltration et ruissellement. Casenave et Valentin (1989) ont montré l'influence des différents types d'états de surface sur l'infiltration en zone sahélienne et ont proposé une typologie. Cette typologie est ici simplifiée et adaptée aux études de l'érosion en Afrique du Nord et en Tunisie en particulier.

Les états de surface sont regroupés en deux types selon leur rôle sur l'infiltration: les surfaces ouvertes et les surfaces fermées.

- les surfaces ouvertes sont constituées des fissures, pores, galeries et mottes qui peuvent être divisées en différentes classes de diamètre (<1 cm, 1-5, 5-8, ≥8 cm par ex.).
- les surfaces fermées sont constituées par les pellicules de battance, croûtes de sédimentation, croûtes d'érosion ou semelle de tassement, cailloux affleurant pris dans la masse du sol.

2.3.2 La couverture du sol

Quand elle existe c'est généralement le premier obstacle à l'interception des pluies, elle participe à la diminution de leur énergie cinétique.

On peut distinguer de nombreux types de couverture du sol:

- par la végétation, selon la taille, le port (vertical ou horizontal), le type (arbustif, herbacé) etc...
- par les résidus au sol (litière, branches etc...)
- par les éléments grossiers posés sur le sol (graviers, cailloux, blocs etc...)

Dans les études menées à l'échelle du bassin versant il est cependant très difficile d'obtenir des relations significatives entre des composantes particulières de la couverture du sol et l'érosion, c'est pourquoi nous nous sommes limités à identifier les trois grands types de couverture en distinguant toutefois pour la végétation les ports arborés ou vertical et le port horizontal couvrant le sol.

2.3.3 Méthode d'évaluation des états de surface et la couverture du sol

Lors des essais de simulation de pluie, l'évaluation des différents types d'état de surface et de couverture du sol se fait sur la placette d'1 m² par identification au contact d'une tige déplacée verticalement selon un maillage carré.

Pour un travail au champ ou en terrain non cultivé nous avons jugé qu'il était plus représentatif de décrire les états de surfaces sur de courts transects. Il est possible d'analyser une centaine de points en les répartissant tous les 10 cm sur une ligne de 10 m. En cas de travail du sol ou d'hétérogénéité liée à la pente, nous effectuons les mesures sur deux lignes perpendiculaires.

Les résultats sont exprimés en %, la somme des surfaces ouvertes et des surfaces fermées est égal à 100 (une surface est toujours ouverte ou fermée). Il est donc impératif d'identifier le type de surface du sol situé sous une couverture. En fonction du niveau d'analyse il est possible de distinguer les pourcentages des différentes formes de surfaces fermées et de surfaces ouvertes.

La couverture du sol s'exprime aussi en pourcentage du nombre total de mesures (100). La variable la plus facile à déterminer est donc % sol nu = 100 - (% sol couvert). Il est possible ensuite de distinguer différentes formes de couverts et d'exprimer un pourcentage en couverture végétale vivace, morte et couverture par cailloux. En ce qui concerne la couverture végétale vivante il est possible de distinguer un pourcentage en port rampant (horizontal), et un pourcentage en port érigé (vertical) La litière, presque inexistante sur le site, a été comptée avec la végétation rampante.

Dans notre analyse nous sommes restés au premier niveau et avons défini les surfaces ouvertes ou fermées et les surfaces nues ou couvertes.

Partie 3 : Résultats et discussion

Dans cette partie nous exposons l'expérimentation que nous avons eue à mener sur le terrain et les résultats obtenus. Nous présentons d'abord le protocole de mesure proprement dit. Les résultats des deux méthodes d'infiltrométrie sont ensuite décrits et discutés. Les mesures qui nous ont permis de caractériser le milieu sont exposées, nous en avons retenu deux :

- Les mesures objectives des états de surface
- Les analyses de texture des sols

Enfin, nous chercherons à mettre en parallèle les mesures hydrodynamiques et les caractéristiques du milieu.

3.1 Choix du site et distribution des mesures

Le site de mesures a été choisi de manière à être représentatif des conditions physiques du sol dans la zone aval aménagée en banquettes (site de mesure EG1). Ceci permet d'évaluer correctement l'influence des variables physiques du sol sur l'infiltrabilité de l'eau.

On a effectué les essais d'infiltration « Beerkan » selon 9 lignes orientées parallèlement à la pente, avec 2 à 5 essais dans chaque ligne selon la longueur de la ligne, (figure13).

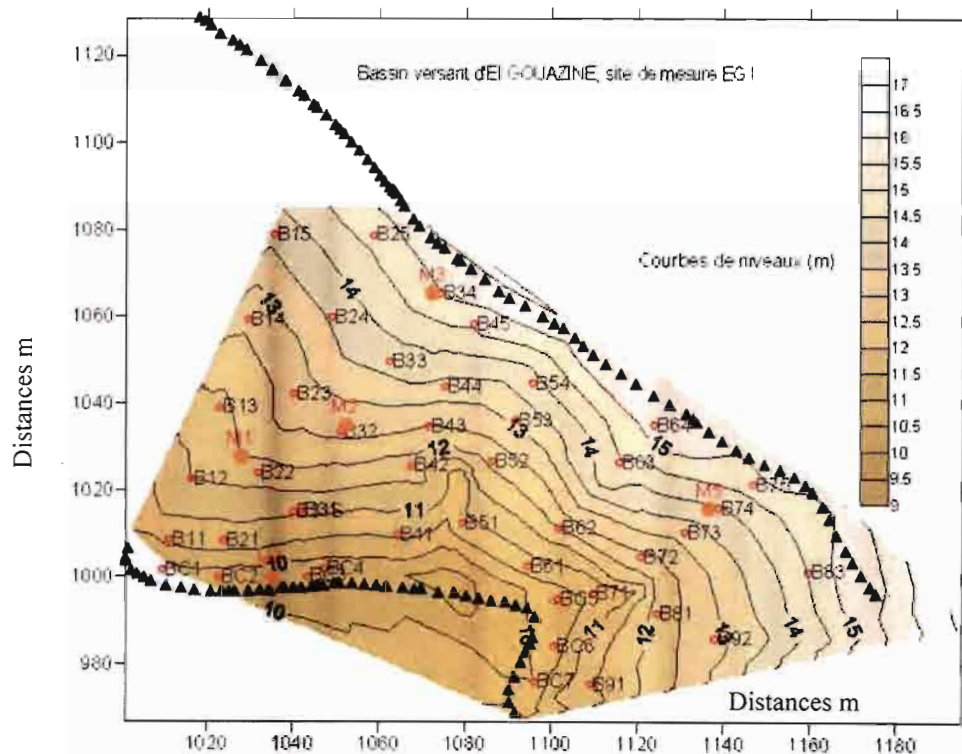


Figure 13 : Localisation des essais de l'infiltration sur une carte topographique du terrain

(Ex. B11 : Essai Beerkan numéro 1 dans la première ligne, BC1 : Essai Beerkan numéro 1 dans le canal. M1 : essai Müntz numéro 1)

Au total 47 essais « Beerkan » ont été effectués. Par ailleurs, on a réalisé 5 essais de l'infiltration « Müntz ». La multiplication des points de mesures a pour objectif de saisir l'hétérogénéité du milieu. Des échantillons de sol ont été prélevés pour mesurer la densité apparente, la granulométrie, l'humidité initiale et l'humidité à saturation dans chaque essai, (annexes 2,4).

Un nivellement fin du site a été réalisé afin de réactualiser les données topographiques présentées par J. Collinet et P. Zante aux figures 9 et 10 et pour positionner exactement les lieux d'expériences (annexe 3). Un tachéomètre laser de marque Leica a été utilisé et la restitution du modèle numérique a été faite avec le logiciel SURFER en utilisant la méthode d'extrapolation par triangulation adaptée à la topographie. On remarque une pente plus forte vers l'aval. Nous sommes sur un pan de versant de forme convexe. Deux micro vallons marqués par des ravines se situent entre les lignes B45 – B41 et B54 – B51 d'une part, et les lignes B75 – B71 et B83 – BC6 d'autre part (figure13).

3.2 Essais d'infiltration

3.2.1 Essais Beerkan

Une fois l'emplacement de l'essai déterminé, la surface du sol a été préparée, (taille des herbes, enlèvement des cailloux et des débris divers), puis un cylindre métallique de 14.9 cm de diamètre a été enfoncé dans le sol à une profondeur variant entre 0.5 à 1 cm. Deux volumes d'eau à verser ont été utilisés ; 120 ml et 140 ml, selon l'état de surface et d'infiltrabilité du sol. L'eau a été versée délicatement en utilisant un entonnoir adapté (voir photo figure 14), pour diminuer la cinétique des gouttes d'eau et éviter de dégrader la structure de surface du sol.



Figure 14 : Essai Beerkan

L'origine du temps et prise à la fin du premier apport. Les apports successifs sont notés en fonction du temps sur le cahier d'expérimentations. L'expérience est terminée lorsque le temps entre deux apports successifs devient sensiblement

constant, ce qui indique l'établissement d'un régime pratiquement permanent. La figure 15 montre la stabilisation de la courbe de la lame infiltrée en fonction de temps dans un essai.

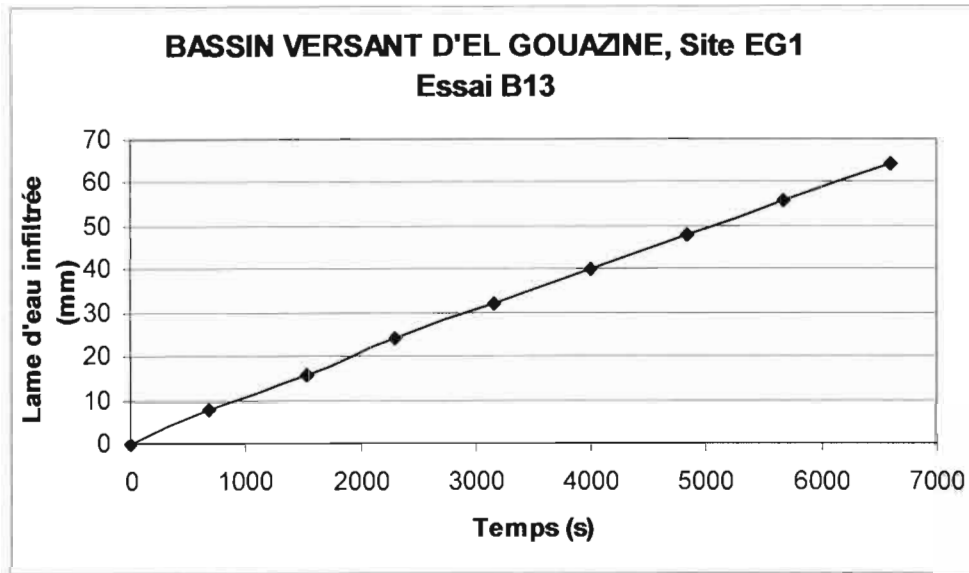


Figure 15 : La lame infiltrée en fonction de temps (essai Beerkan 13).

A la fin de l'expérimentation, un échantillon du sol est prélevé dans le cylindre d'infiltration pour déterminer l'humidité saturée du sol. D'autres échantillons de sol sont prélevés autour de l'essai afin de déterminer les paramètres du sol à l'état initial (humidité, initiale, densité apparente, granulométrie). (Annexes 2 et 4).

Le dépouillement de ces données et de la lame infiltrée en fonction du temps par le programme BEST 2, a nous permis de déterminer les paramètres hydrodynamiques du sol, apparents dans les équations (9) et (11) page 21, sauf pour les sites BC4, B24 et B34. Pour ces trois sites il semble qu'il y ait eu des erreurs dans les analyses granulométriques, problèmes d'étiquetages des échantillons. Ces résultats sont présentés dans le tableau 1. Le tableau 2 récapitule les données statistiques relatives à ces paramètres.

Tableau 1 : les paramètres hydrodynamiques du sol des sites Beerkan

Birkane N°	Sorptivité	Ks mm/s	Hg mm	n	η Brooks&Corey
BC1	0,35	0,0052	-39,6805	2,1448	13,7734
BC2	0,4	0,03	-16,7756	2,3428	8,4435
BC3	0,27	0,007	-24,6894	2,1407	14,0182
BC5	0,8	0,026	-44,2092	2,1744	12,2989
BC6	0,51	0,013	-43,0322	2,1347	14,4061
BC7	0,4	0,0058	-36,3032	2,3074	8,9405
B11	0,28	0,0079	-41,6971	2,2517	9,9618
B12	0,22	0,0063	-33,9062	2,2897	9,2269
B13	0,2	0,004	-51,2589	2,2788	9,4208
B14	0,22	0,0048	-46,1574	2,2163	10,848
B15	0,23	0,0031	-85,51	2,247	10,0678
B21	0,26	0,0086	-31,8218	2,2381	10,2742
B21S	0,49	0,014	-50,5347	2,2966	9,1128
B22	0,25	0,0055	-97,3456	2,2488	10,0272
B22S	0,55	0,017	-49,0855	2,2692	9,6013
B23	0,24	0,0064	-40,6516	2,435	7,4879
B25	0,21	0,0051	-34,809	2,2067	11,1355
B31	0,4	0,01	-60,2085	2,2707	9,5733
B31S	0,37	0,011	-59,6412	2,5734	6,5646
B32	0,49	0,011	-97,3456	2,2488	10,0272
B33	0,23	0,0053	-40,1574	2,2226	10,6715
B41	0,4	0,013	-40,4366	2,1857	11,851
B42	0,44	0,013	-52,7406	2,2129	10,9469
B43	0,37	0,0087	-46,8883	2,1786	12,1275
B44	0,38	0,011	-37,7535	2,2156	10,8671
B45	0,1	0,017	-20,7893	2,1809	12,0357
B51	0,28	0,0057	-38,4236	2,1809	12,0357
B52	0,18	0,0071	-6,9375	2,2253	10,5987
B53	0,15	0,003	-45,5581	2,1849	11,8803
B54	0,18	0,0033	-25,3901	2,1659	12,6725
B61	0,53	0,01	-38,6268	2,1253	15,0844
B62	0,47	0,011	-56,2429	2,1802	12,0619
B63	0,2	0,011	-12,9734	2,2035	11,2341
B64	0,2	0,0048	-24,87	2,1915	11,6378
B71	0,54	0,01	-95,3347	2,1883	11,7538
B72	0,35	0,0076	-43,6952	2,2103	11,0238
B73	0,54	0,013	-68,8497	2,3351	8,5446
B74	0,39	0,0078	-45,4154	2,1889	11,7338
B75	0,28	0,0064	-16,3714	2,1091	16,4924
B81	0,28	0,0093	-24,8725	2,1958	11,4898
B82	0,4	0,0073	-69,2722	2,2247	10,6154
B83	0,3	0,0059	-48,1546	2,2057	11,1641
B91	0,24	0,0054	-20,8965	2,1215	15,3845
B92	0,35	0,0062	-52,926	2,2154	10,8737

Tableau 2 : Données statistiques des paramètres mesurés

	Sorptivité	Ks mm/s	Hg mm	n	η Brooks&Corey
Médiane	0,325	0,008	-42,365	2,212	10,985
Moyenne	0,339	0,009	-44,505	2,226	11,136
Ecartype	0,139	0,005	21,123	0,083	2,005
Valeur max	0,8	0,03	-6,938	2,573	16,492
Valeur min	0,1	0,003	-97,346	2,109	6,565

On s'intéresse en priorité au paramètre K_s qui est le plus important pour déterminer la part de la pluie qui s'infiltre et celle qui ruisselle, lorsqu'on dispose des intensités pluviométriques.

Un premier examen des données montre que si l'on répartit les valeurs selon 7 classes de vitesse de filtration (*in* Chamayou et Legros 1989) (tableau. 3 et figure16) les valeurs de K_s se groupent à 90% dans les classes à perméabilité assez lente à moyenne. La dispersion des mesures est donc faible.

Tableau 3 : Les classes de K_s (*in* Chamayou et Legros 1989)

Vitesse de l'infiltration	Classes mm/s	Effectif	Effectif %
très lente	$< 3 \cdot 10^{-4}$	0	0,00
lente	$3 \cdot 10^{-4} - 1.5 \cdot 10^{-3}$	0	0,00
assez lente	$1.5 \cdot 10^{-3} - 6 \cdot 10^{-3}$	14	32,56
moyenne	$6 \cdot 10^{-3} - 1.7 \cdot 10^{-2}$	25	58,14
assez rapide	$1.7 \cdot 10^{-2} - 3.5 \cdot 10^{-2}$	4	9,30
rapide	$3.5 \cdot 10^{-2} - 7 \cdot 10^{-2}$	0	0,00
très rapide	$> 7 \cdot 10^{-2}$	0	0,00

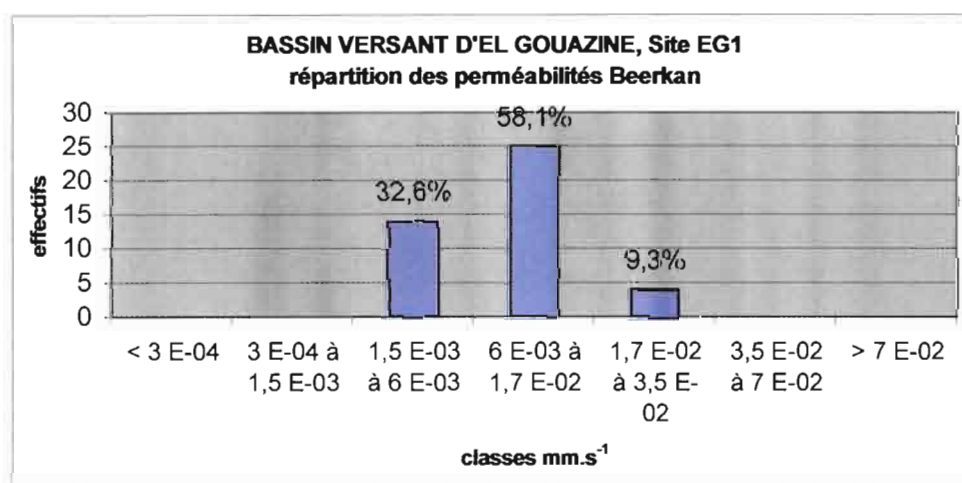


Figure 16 : Répartition des K_s observés

En reportant ces valeurs sur la carte du site, il apparaît trois regroupements géographiques :

- le premier aux valeurs les plus faibles, est plutôt situé dans la partie amont et descend en limite des sites B12 et B31,
- le second correspond à la classe de vitesse moyenne. Il s'étend sur le reste de l'inter-banquette, les valeurs en B51 et B83, peuvent être en fait incluses dans cette classe car elles ont des valeurs très proches de sa limite inférieure,
- le canal amont de la banquette est quant à lui une unité mixte comprenant des valeurs appartenant aux trois classes en raison de sa forte hétérogénéité avec une dominance des valeurs moyennes (figure 17).

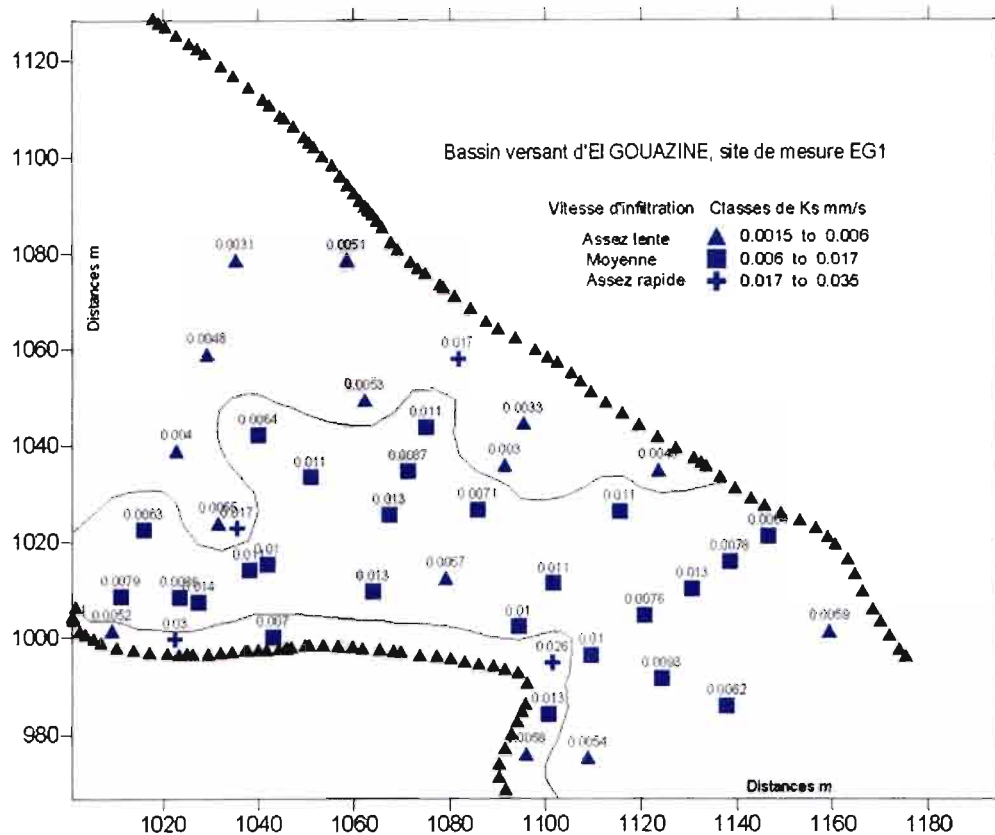


Figure 17 : Délimitation de zones à différentes perméabilités

Nous avons essayé d'interpréter les données en calculant un variogramme sur les valeurs observées de K_s (Figure 18). La forme du variogramme obtenu ne montre pas une variation continue suivant des directions du bassin. En effet on a peu de variabilité de la conductivité hydraulique à saturation pour un nombre assez réduit d'observations (44).

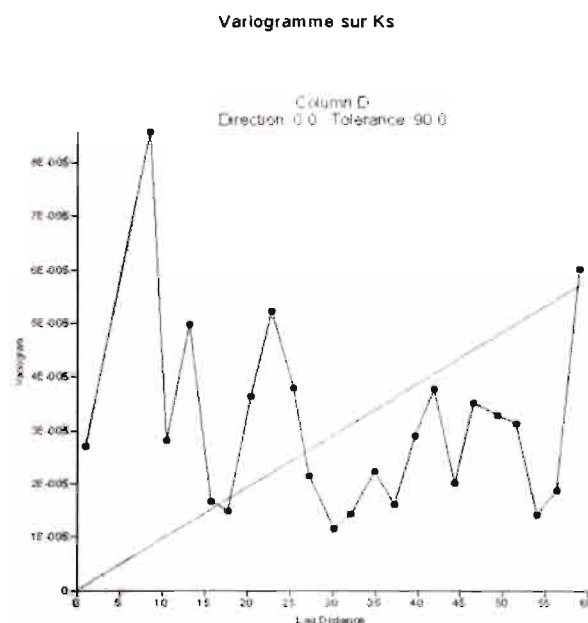


Figure 18 : Variogramme sur K_s

La division en classe de perméabilité suivant la classification proposée par Chamayoux et Legros (1989) permet cependant de diviser notre terrain en trois

parties, une zone amont plus imperméable, une zone moyennement perméable en position médiane et une zone où les trois types d'infiltrabilité se côtoient, c'est la zone de fossé amont à la banquette où s'accumulent les sédiments et où l'humidité favorise la macroporosité par l'installation de végétation et de mésofaune. Dans le canal, s'accumulent des éléments fins qui devraient limiter la perméabilité, mais l'installation de végétation et la quantité plus importante d'animaux terricoles (fourmis, vers de terre...) favorise l'apparition des surfaces ouvertes.

3.2.2 Essais Muntz

La taille des anneaux utilisés dans notre expérimentation est de 55 cm de diamètre pour l'anneau de garde et de 30 cm pour l'anneau de mesure.

Une charge constante de 3 cm d'eau dans les cylindres est obtenue par le réglage d'un système de réservoirs de Mariotte. Un tube alimente le réservoir en air par le sommet, l'eau s'écoule par un deuxième tuyau dont l'orifice est environ 5 mm au dessus de l'orifice du premier tuyau d'entrée de l'air (Figure 19).

L'enfoncement des cylindres est réalisé verticalement à une profondeur de 6 cm dans le sol. Un système de vis a été utilisé pour régler le niveau des tubes d'alimentation en eau et en air dans les cylindres sur le sol. Une membrane perméable a été disposée dans les cylindres pour protéger la surface d'infiltration des éventuels remous dus à l'alimentation intermittente en eau.

Après remplissage des deux cylindres, on a mesuré la lame infiltrée en fonction du temps dans le cylindre central. La mesure est poursuivie jusqu'à obtenir une vitesse d'infiltration stable (Δt est stable).



Figure 19 : Essai Muntz

Ces tests ont été menés sur 4 sites localisés dans l'inter-banquette à proximité de sites Beerkan et un essai a été pratiqué dans le canal (M4).

Un second test a été réalisé après un ressuyage de 2 heures sur les sites M1 M2 M3 puis un troisième après un nouveau ressuyage de 16 et 17 heures en M2 et M3.

Nous avons effectué un ajustement non linéaire des lois d'infiltration de Philip et de Green Ampt, sur les données expérimentales de la lame infiltrée en fonction du temps $I(t)$. Ceci nous a permis d'obtenir les valeurs de K_s dans les cinq essais Muntz, ces valeurs sont présentées dans le tableau 4. Les figures 20, 21, 22,

montrent les ajustements des lois de Philips et de Green et Ampt aux données d'infiltration sur les expériences aux sites M1, M2, et M3.

A la fin de chaque expérimentation après avoir retiré les anneaux, on a procédé à des prélèvements à la tarière pour des mesures de l'humidité. Un profil initial caractérisant l'état « sec » a été réalisé près du site.

Tableau 4 : Détermination du K_s (mm/s) par méthode Müntz

Essais Müntz	K_s dans l'expérience initiale mm/s	K_s après 2 heures de ressuyage. mm/s	K_s après 16 heures de ressuyage. mm/s	K_s après 17 heures de ressuyage. mm/s
M1	0.040	0.015		
M2	0.021	0.0076	0.0037	
M3	0.049	0.0306		0.010
M4	0.0003			
M5	0.015			

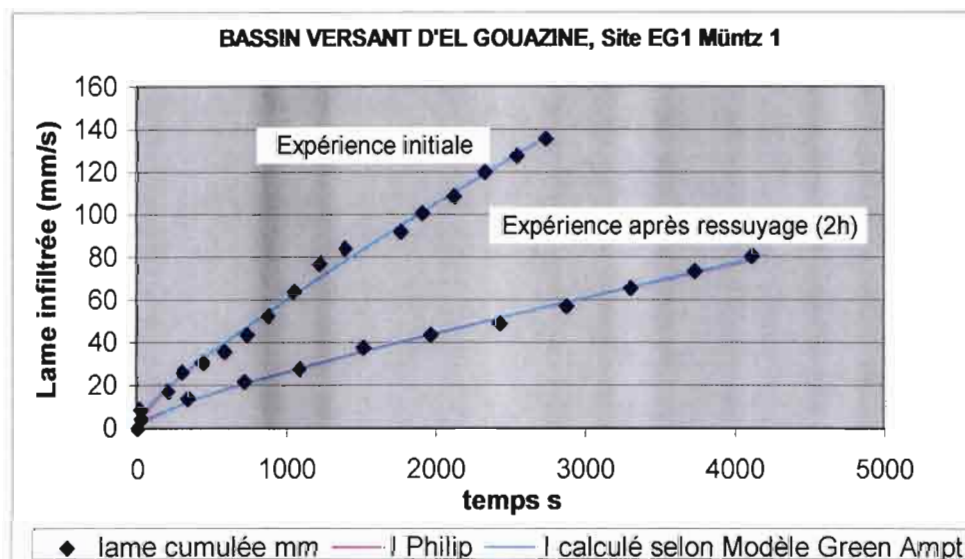
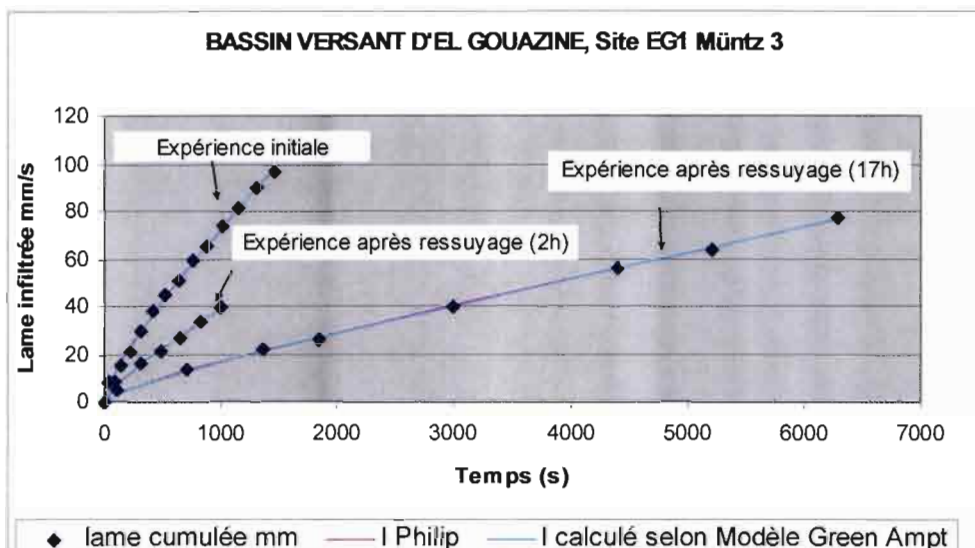
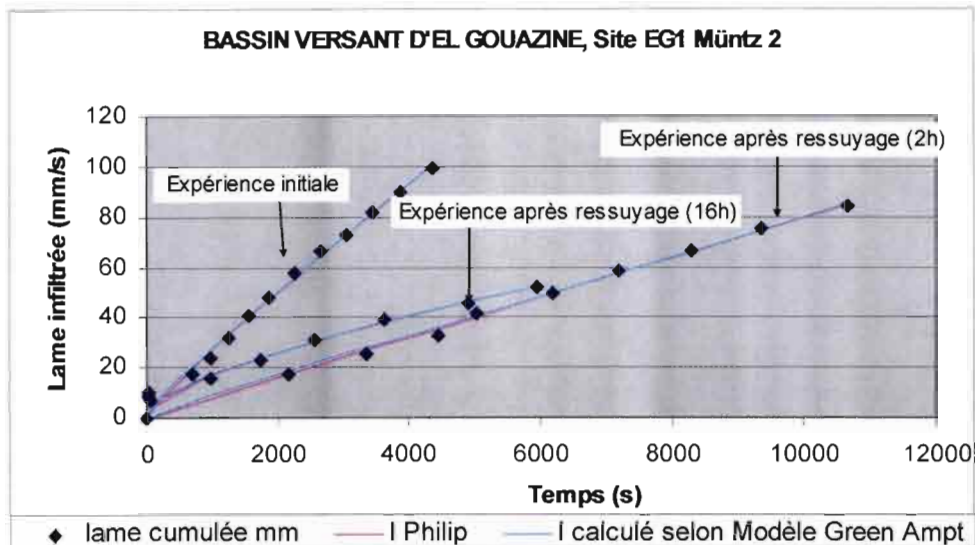


Figure 20 : Ajustement de lois d'infiltration à l'expérimentation en M1



Pour les trois premiers essais, on peut remarquer que les valeurs de K_s ont diminué dans les expérimentations successives après les ressuyages et assèchements des surfaces : après 2 heures de ressuyage et après 16 et 17 heures pour M2 et M3 respectivement. A cette diminution importante de la valeur de stabilisation de la conductivité hydraulique on peut avancer les raisons suivantes :

- On assiste durant les expérimentations à des mises en suspension des argiles durant la période d'inondation et leur floculation lors de l'assèchement avec colmatage de la surface. Pour ces expérimentations on a utilisé de l'eau distribuée par le réseau (chez l'observateur, ou de la station service près d'Ousseltia). Sa conductivité est basse de l'ordre de $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ et son Ph neutre. Il est possible que la nature chimique de l'eau ait une action sur la surface du sol. Il aurait été préférable de travailler avec de l'eau de pluie ou une eau déminéralisée.

- Il est possible que l'argile présente dans le sol ait gonflé entre les 2 essais d'infiltrations, ce qui a réduit les tailles des pores et par conséquent la conductivité à saturation
- Lors des premiers essais la stabilisation de la vitesse d'infiltration n'était pas réellement obtenue et il aurait fallu poursuivre l'expérimentation au-delà des temps déjà longs d'expérimentation (plus de deux heures sur le Muntz 3).

Les essais M4 (dans le canal) et M5 (dans une zone caillouteuse) présentent des résultats assez particuliers.

Pour M4, une fonction $I = s\sqrt{t}$ s'ajuste parfaitement aux lames infiltrées mesurées (figure 23). Cette forme de croissance de la lame infiltrée est typique d'une infiltration horizontale où les effets de la gravité seraient absents. Nous avons mis ce résultat sur la nature argileuse du site. Pour avoir des effets gravitaires sensibles, il aurait fallu prolonger l'essai beaucoup plus longtemps que ce qui a été fait.

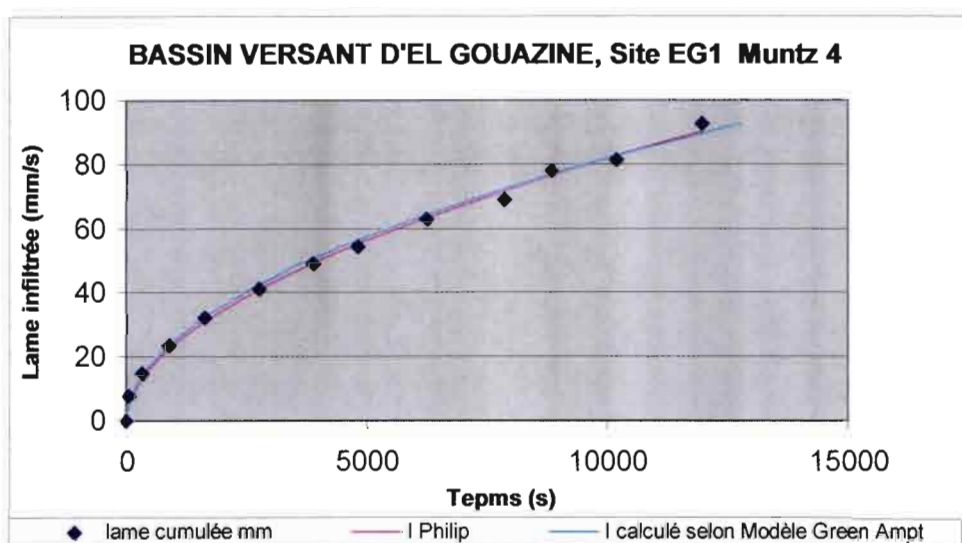


Figure 23 : Ajustement des lois d'infiltration à l'expérimentation en M4.

Quant à l'essai M5, la lame d'eau a mis beaucoup de temps pour s'infiltrer au début, puis l'infiltration a lieu comme si le milieu était saturé (figure 24). En effet, si on enlève le premier point, la lame infiltrée s'ajuste parfaitement sur une droite. Le sol réagit comme un milieu saturé sans aucun effet de la capillarité. A ce résultat, nous avons donné deux explications plausibles :

- Une compression de l'air au début de l'essai qui a pratiquement bloqué l'infiltration, et puis l'air s'est échappé et l'infiltration a pu continuer. Cependant, aucune manifestation de bulles d'air à la surface n'a été observée, et il est difficile d'expliquer les résultats de cet essai.
- La surface battante du sol cachait une importante macroporosité, cette surface s'humidifiant n'a plus fait obstacle à la macroporosité. N'ayant pas dépouillé les données sur le terrain, il n'a pas été possible de revenir vérifier cette seconde hypothèse.

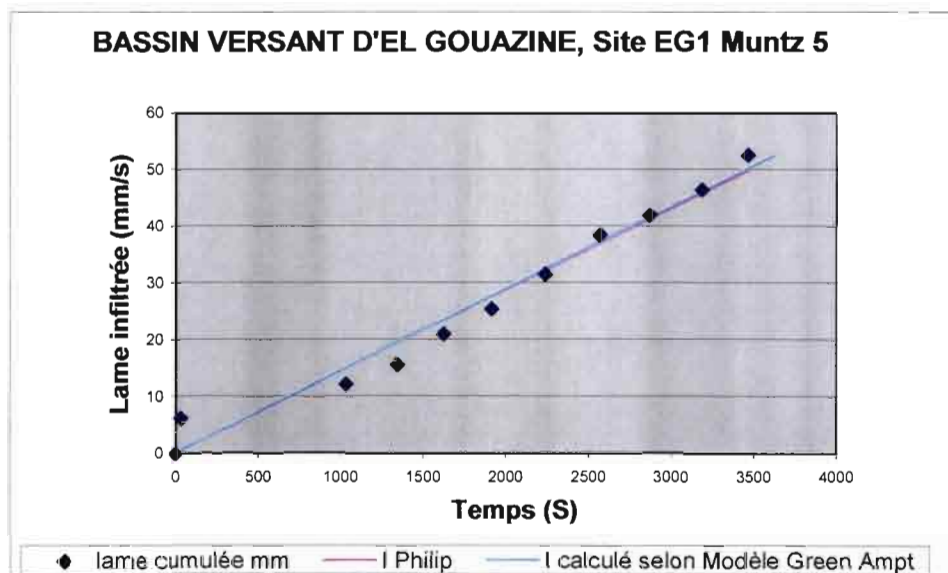


Figure 24 : Ajustement des lois d'infiltration à l'expérimentation en M5

De ces cinq expérimentations Müntz, il est raisonnable de ne conserver que les trois premières. Le Müntz 5 doit avoir un défaut de choix de site tandis que le Müntz 4, il est difficile de considérer une infiltration sans composante gravitaire.

Par comparaison avec les valeurs des conductivités hydrauliques à saturation obtenues par la méthode Beerkan, il paraît raisonnable de prendre en considération les expérimentations réalisées sur des sols déjà bien humides. Nous retiendrons donc les valeurs du tableau 5. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celui donné par les infiltromètres Beerkan et sont représentatives de la zonation proposée à la figure 17. Les figures 25, 26, et 27, montrent pour chacune de ces trois expérimentations, les profils d'humidité massique initiaux et finaux (après la dernière expérimentation). Les taux d'humidité à la dernière expérimentation ne sont pas particulièrement forts mais restent compatibles entre expérimentations Müntz et Beerkan.

Tableau 5 : Valeurs de Ks retenues pour l'expérimentation Müntz

Site Müntz	Ks mm/s
M1	0.015
M2	0.0037
M3	0.010

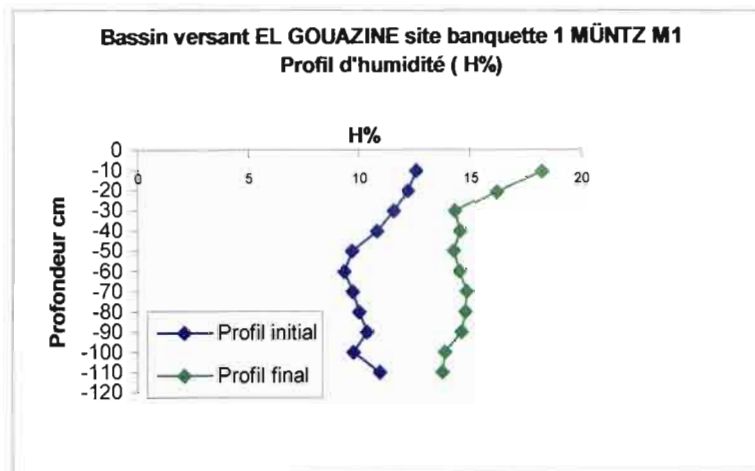


Figure 25 : Les profils d'humidité dans le site M1

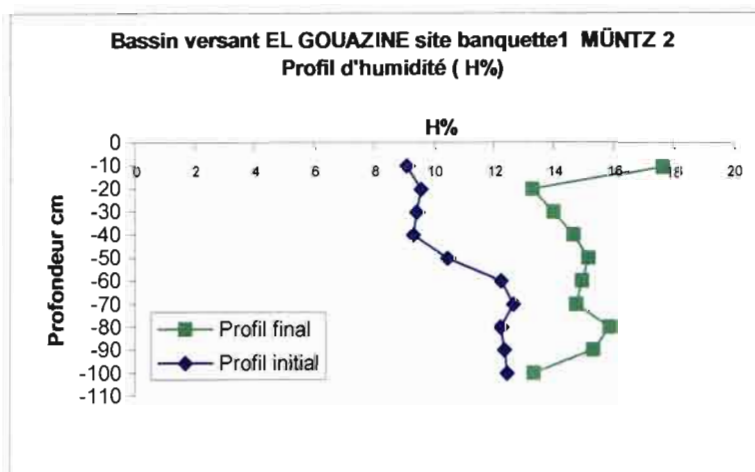


Figure 26 : Les profils d'humidité dans le site M2

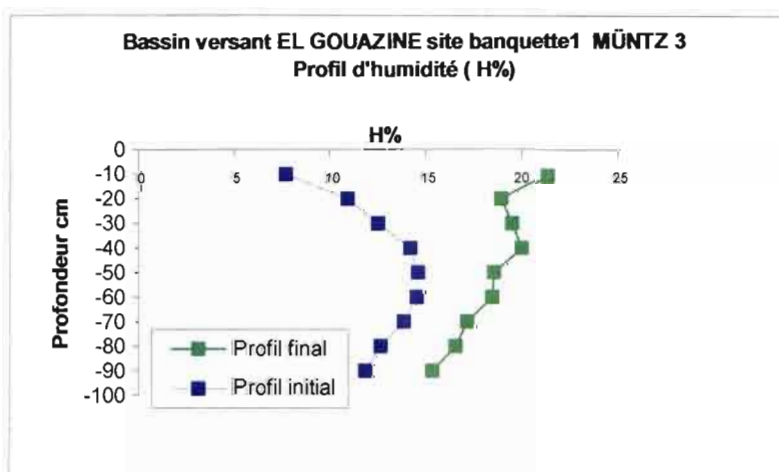


Figure 27 : Les profils d'humidité dans le site M3

3.3 Caractéristiques physiographiques du site et comparaison avec les paramètres hydrodynamiques

3.3.1 Les états de surface

Faute de temps il n'a pas été possible d'effectuer de mesure d'états de surface du sol pour chaque site Beerkan. On a réalisé ces mesures sur 8 sites bien répartis sur l'aire étudiée, (figure 28). Ces mesures ont consisté en des observations réalisées tous les 10 cm sur une longueur de 10 m. Elles ont eu pour objectif de quantifier les grands types d'états de surface identifiés visuellement lors des travaux de terrain (annexe 5).

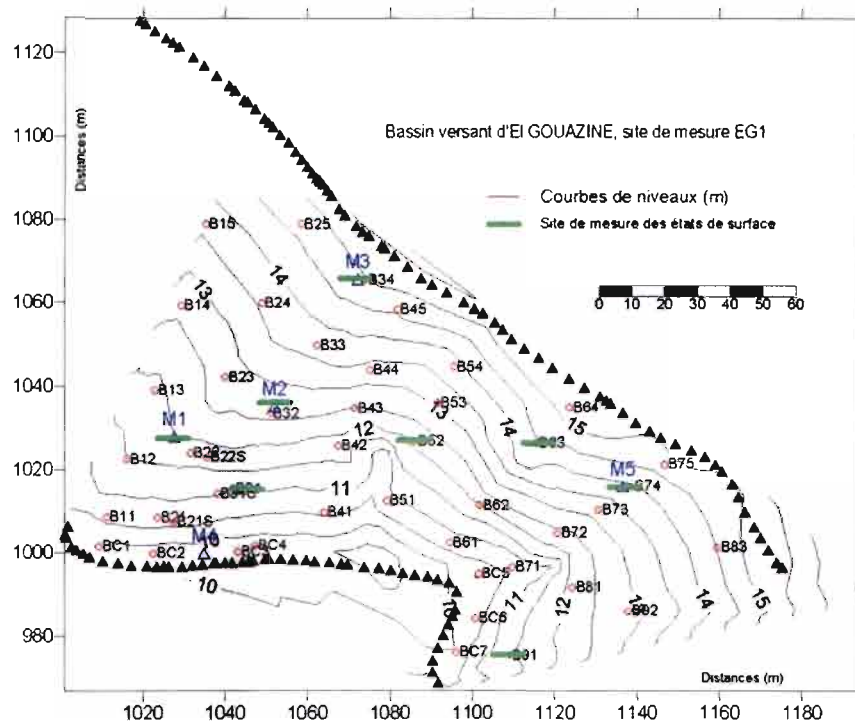


Figure 28 : La répartition des sites des mesures des états de surface.

La figure 29 montre la répartition des surfaces fermées et ouvertes sur les 8 sites de mesures.

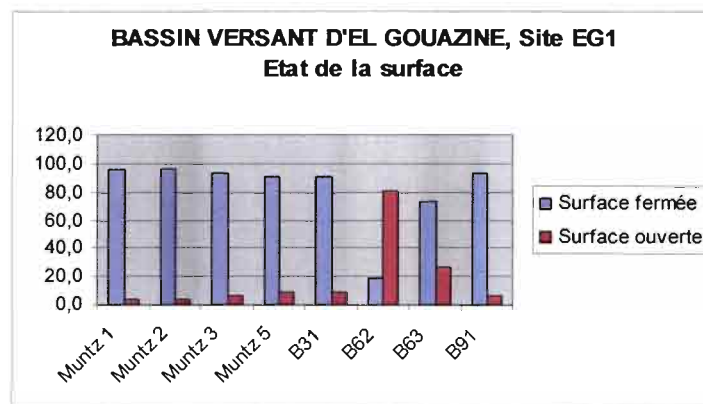


Figure 29 : Répartition des surfaces ouvertes et fermées

Un premier examen montre que la grande majorité des sites (7 sur les 8) sont constitués de surfaces fermées qui occupent plus de 80% de la surface du sol. Le site B62 par contre représente une zone à argile à forte dynamique structurale et n'a que 20% de surfaces fermées en état sec.

D'autre part, grâce à la très bonne pluviométrie de cette année, la végétation s'est bien développée et couvre en moyenne plus de 55% de la surface avec un minimum de 45% pour le site MUNTZ 2 (figure 30).

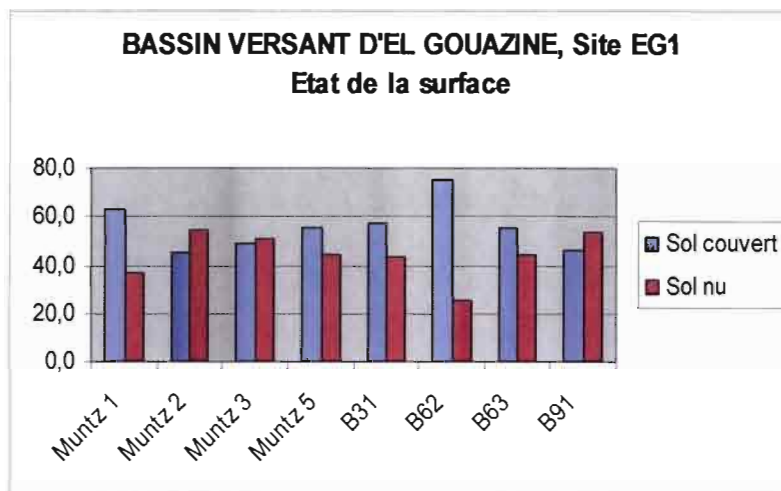


Figure 30 : Couverture du sol par la végétation sur le site EG1

Le pourcentage total de cailloux apparaissant en surface est variable ; pratiquement nul dans le canal il approche les 35% de la surface dans la région du site B63 (figure 31)

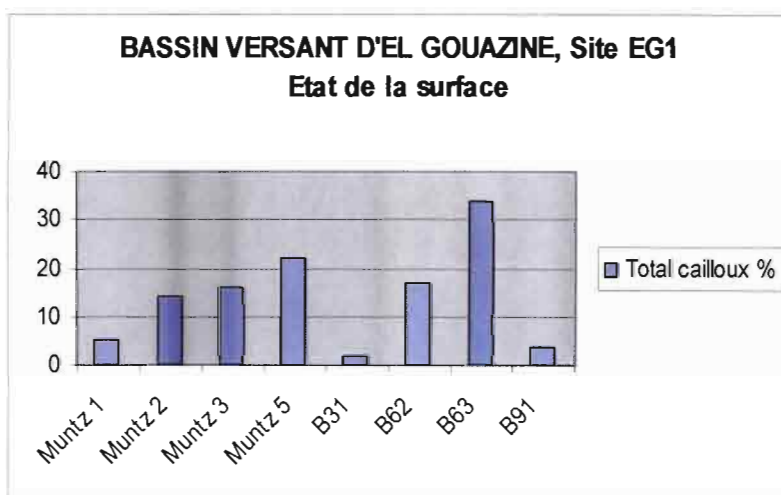


Figure 31 : Pourcentage total de cailloux sur le site EG1

Trois grandes zones étaient discernables: sol peu couvert à pellicule de battance (représenté par M1, M2, M3, M5) ou croûte de sédimentation (B31), sol très caillouteux en surface (B63), sol plus ouvert à végétation plus dense et plutôt à port érigé (B62) (figures 32,33).

3.3.1.1 Surfaces fermées

L'examen de la répartition des différents types de surfaces fermées montre qu'il existe bien un gradient selon la pente: le pourcentage occupé par les pellicules de battance augmente de l'aval vers l'amont alors que corrélativement, la part des croûtes de sédimentation diminue (B31, M1, M2, M3) (figure 33). Il apparaît également que le site MUNTZ 5 a les mêmes répartitions que M3, tous deux situés en amont. Les sites B62 et B63 sont situés dans la zone la plus caillouteuse de l'interbanquette, leurs surfaces fermées sont essentiellement constituées par de la pellicule de battance et des cailloux pris dans la masse du sol. Il faut toutefois rappeler que le site B62 ne possède que 20% de surfaces fermées (figures 32,33).

3.3.1.2 Surfaces ouvertes

Pour ce qui concerne les surfaces ouvertes, elles sont partout uniquement constituées par une faible porosité due essentiellement à des ruptures des pellicules ou à l'affleurement de quelques agrégats. Le site B62 fait cependant exception, les surfaces ouvertes sont constituées à 40% par une porosité intergranulaire et à 60% par des fentes. Les photos de la figure 32 montrent deux états de surfaces différents, le premier à fort pourcentage de surface ouverte (81%) et le second à pourcentage de surface ouverte plus faible (27%).

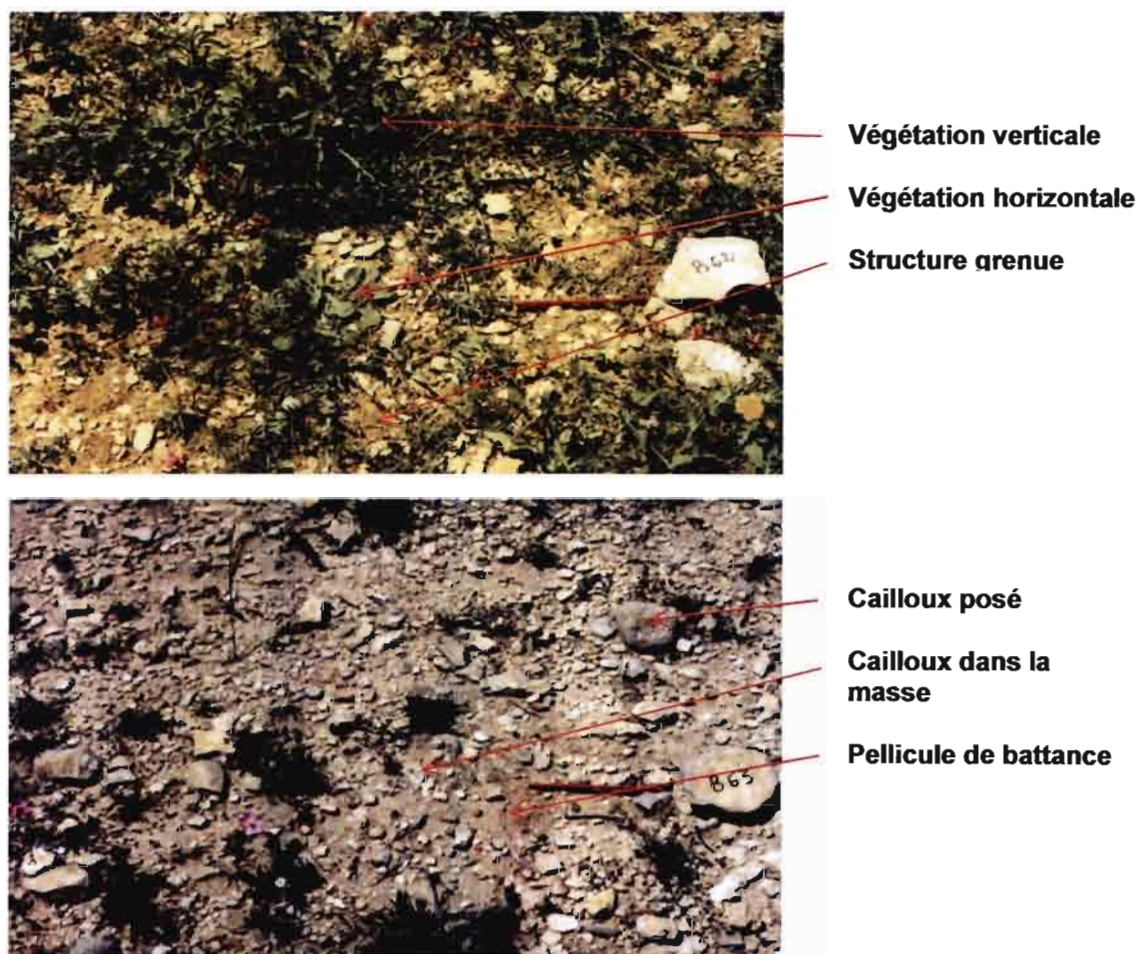


Figure 32 : Photos d'états de surfaces B62 et B63

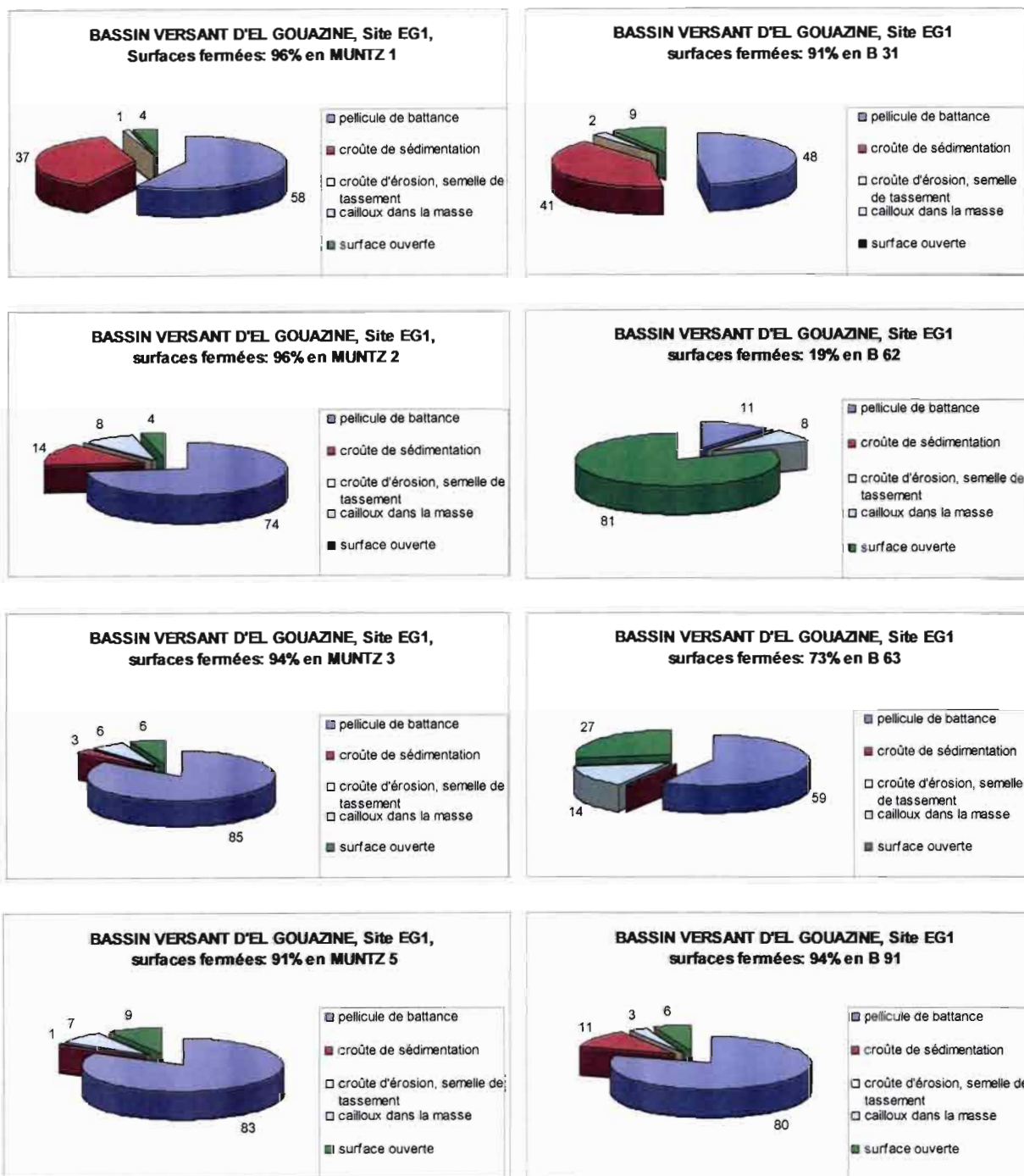


Figure 33 : Les composantes des surfaces fermées

3.3.1.2 Surfaces couvertes

La répartition des différents types de couverture du sol reflète bien l'aspect visuel de la parcelle (figure 34): les sites B31, MUNTZ1, 2, et 3 sont couverts uniquement par de la végétation à port horizontal et des cailloux alors que le reste de l'inter-banquette est aussi peuplé par de la végétation à port vertical. Ceci correspond en fait à la partition entre la zone qui est parfois mise en culture et celle qui reste en jachère. Il faut aussi remarquer que dans la zone à végétation horizontale, la répartition des cailloux suit la même logique topographique que

celle des pellicules de battance: le pourcentage de cailloux augmente en passant de B31 à MUNTZ 1, 2, et 3.

B91 se rapproche des sites MUNTZ 2 et 3 avec sensiblement les mêmes pourcentages de couverture par de la végétation à port horizontal mais montre l'apparition de végétation à port vertical.

B63 et MUNTZ 5 sont situés dans le même type de paysage avec une répartition égale entre les deux types de végétation et la couverture caillouteuse soit environ 20% pour chaque. (Photo 2 de la figure 32).

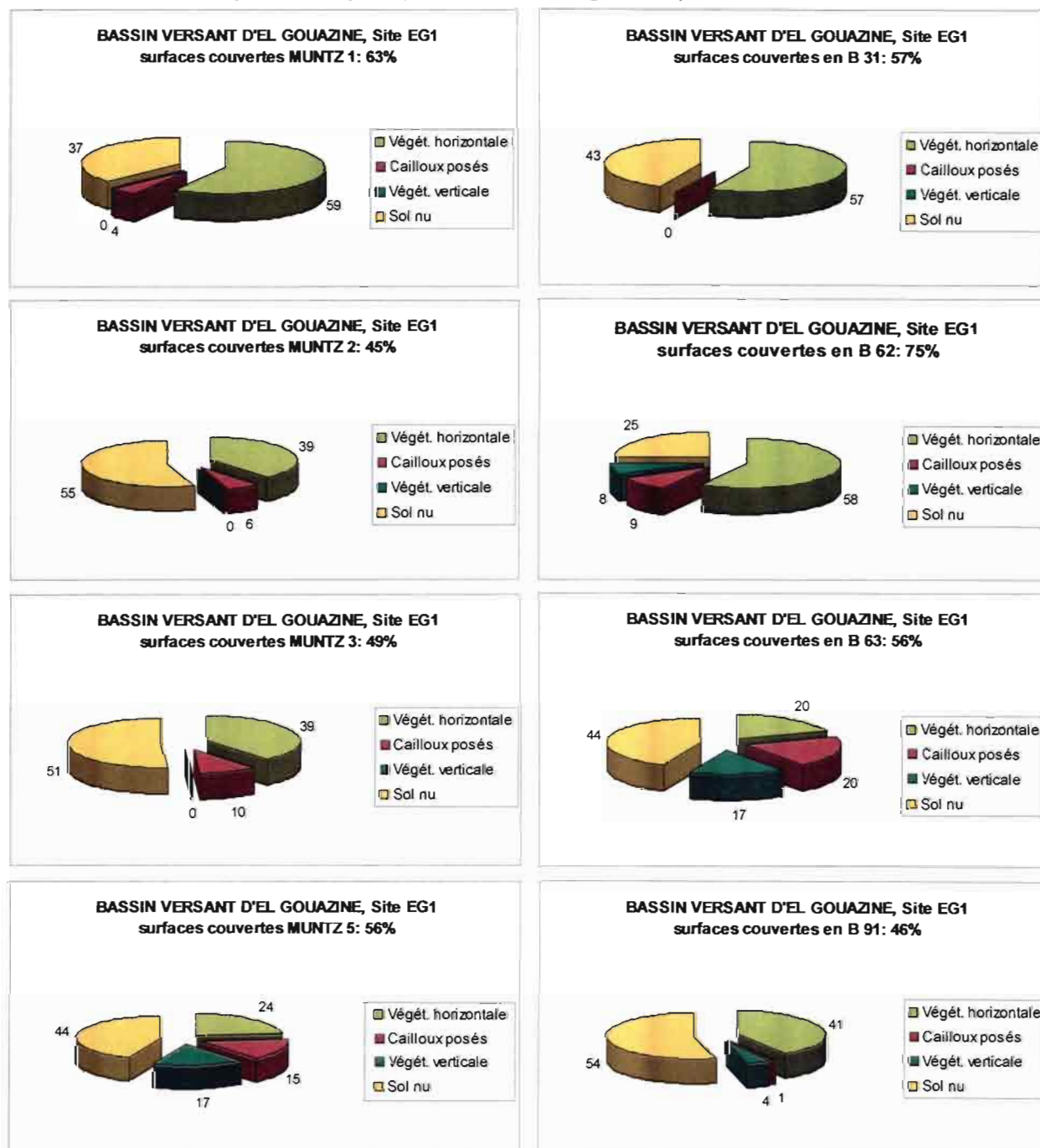


Figure 34 : Les composantes des surfaces couvertes

3.3.2 Relation K_s - états de surface

En raison du faible nombre de mesures des types d'états de surface il est d'une part difficile d'établir une relation K_s - états de surface et d'autre part il n'est pas raisonnable d'en produire une carte de répartition spatiale. On peut voir cependant que la zone aux K_s les plus faibles correspond plutôt à celle où les taux de pellicule de battance sont les plus forts (60 à 80%) (Carte de la figure 17 zonation des K_s et figure 33).

3.3.3 Etude de la texture des sols

La granulométrie en 5 fractions (0-2, 2-20, 20-50, 50-200, 200-2000 μm) a été réalisée sur 48 échantillons prélevés sur les sites de mesure Beerkan et Müntz.

Les résultats d'analyse montrent une faible dispersion texturale de la partie supérieure du sol, la grande majorité des échantillons étant classés en texture sablo-argileuse du triangle GEPPA (1963) (*in* Denis 1988) (figure 34). Les teneurs en argile sont groupées entre 10 et 20% (sauf BC4, 43%) et la fraction limoneuse est centrée autour de 10%. La fraction grossière constitue la part la plus importante du squelette (70%) avec une forte quantité de sables grossiers (44%).

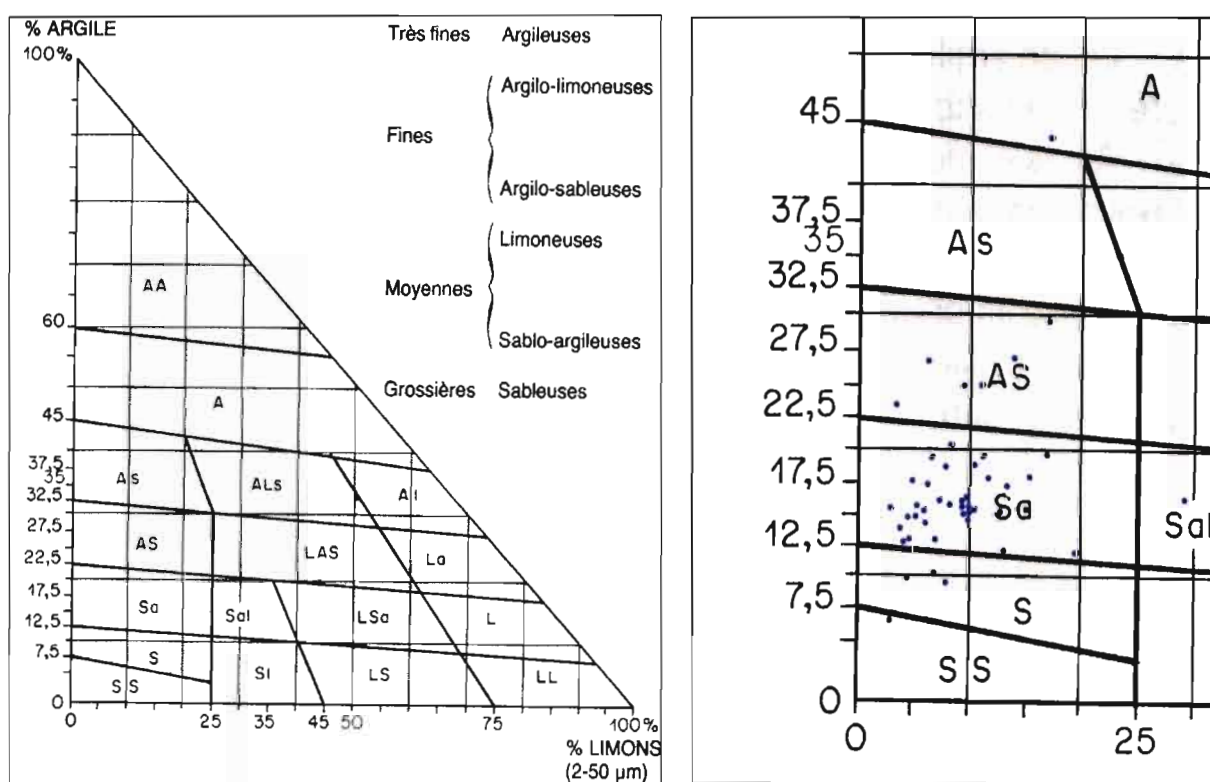


Figure 35 : Diagrammes GEPPA des textures (1963)

• Points expérimentaux, S Sable, L Limon, A Argile

On remarque toutefois une répartition non aléatoire des fractions granulométriques dans cet espace inter-banquette. En regroupant les fractions Argile et Limons fins, il apparaît cinq grandes zones texturales qui s'ordonnent à peu près perpendiculairement à la pente (figure 36): une zone de 14 à 19% (classe 12-20), une de 21 à 24%, une autre autour de 26-28%, une autre à l'amont autour de 31% et

enfin le canal hétérogène avec des parties argileuses (jusqu'à 60% en A+L) et sableuses.

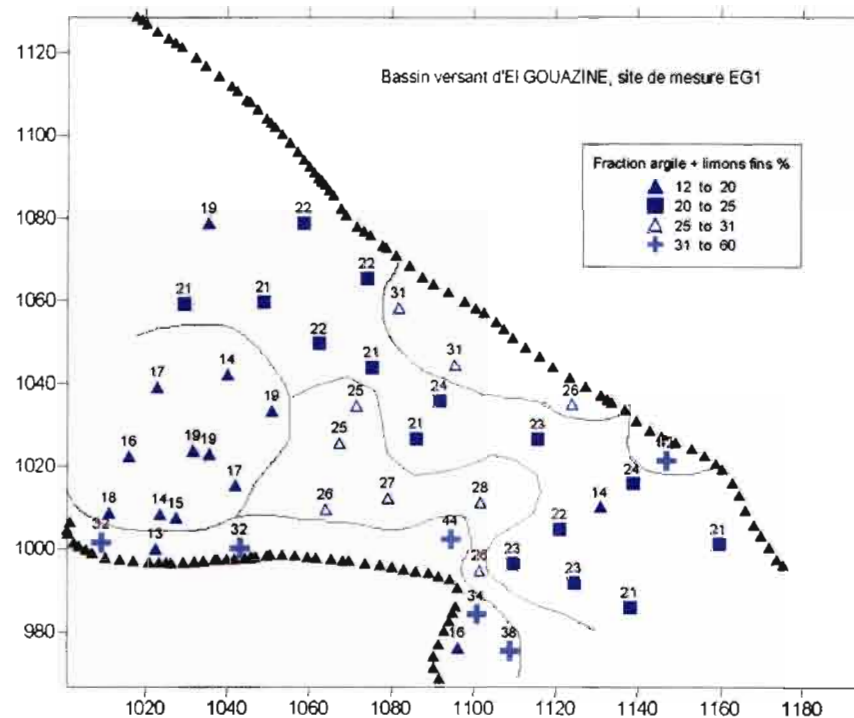


Figure 36 : Zonation texturale de la zone d'étude : éléments fins

Pour ce qui concerne la fraction sables grossiers (Figure 37), deux classes dominant, 35-45% dans la partie centrale et amont et 45-55 de chaque côté.

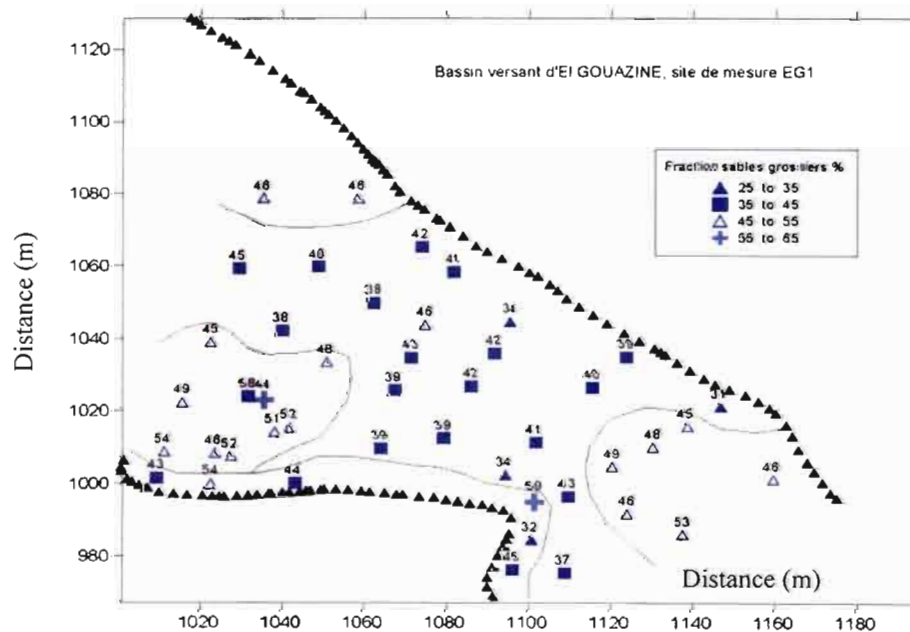


Figure 37 : Zonation texturale de la zone d'étude : éléments grossiers

3.3.4 Relation K_s - granulométrie

Nous avons recherché l'existence de relation entre K_s et les différentes fractions granulométriques (figure 38). En raison de la faible amplitude des valeurs de K_s et d'une granulométrie relativement homogène sur l'ensemble du site il n'apparaît pas possible d'établir directement ces relations.

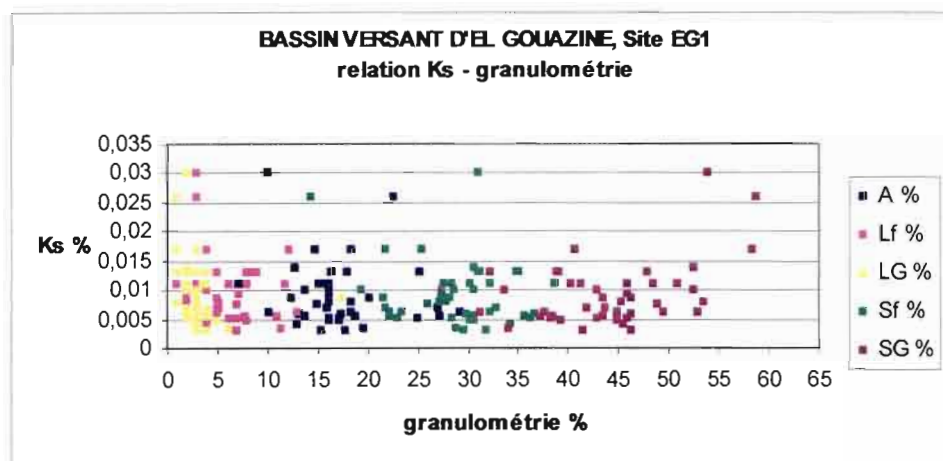


Figure 38 : K_s en fonction de la granulométrie

Cependant, on constate que les valeurs de K_s les plus fortes correspondent aux sites les plus sableux situés dans le canal (BC2, BC5). Ce sont ces sites qui ont l'horizon sableux le plus épais. Les autres, situés dans l'inter-banquette, n'ont en général qu'une fine couche de sable superficiel d'où un effet limité sur les caractéristiques de l'infiltration.

Si dans la relation $K_s=f(\text{granulométrie})$ on regarde la distribution des données, on peut éventuellement établir deux lots dans la fraction SG et avec celui constitué des sites B41, B42, B45, B61, B75, BC2 et BC5 qui procurent la dispersion maximale de l'échantillon en teneurs en SG et en K_s , il est alors possible d'établir une relation entre ces deux variables (Figure 39).

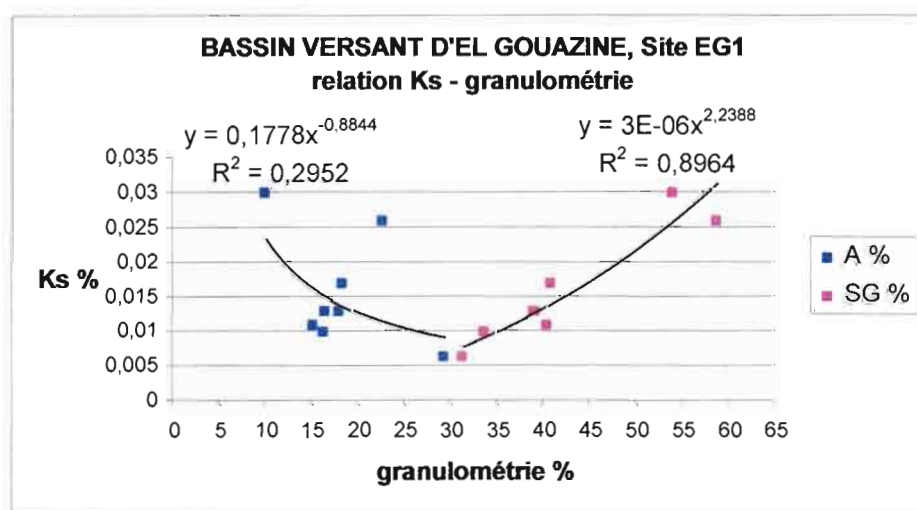


Figure 39 : K_s en fonction du % argile ou sable grossier

On remarque une corrélation négative entre le K_s et les pourcentages d'argile et une corrélation positive entre le K_s et les pourcentages en sable grossier en prenant les échantillons les plus extrêmes.

Après cet exposé détaillé des résultats, on peut conclure que :

- Les valeurs de k_s les plus faibles correspondent plutôt à la zone où les taux de pellicule de battance sont les plus forts (60 à 80%) (figure 17 et figure 33).
- Les valeurs de k_s les plus fortes correspondent aux sites les plus sableux situés dans le canal (BC2, BC5) mais il est difficile de faire ressortir une relation directe entre la texture du sol et la répartition des valeurs de k_s . Pour cela nous avons dû prendre qu'une partie de l'échantillon, celle des valeurs extrêmes.
- Les valeurs moyenne et médiane de la conductivité hydraulique à saturation (0.009 et 0.008) correspondent à la classe moyenne des conductivités (tableaux 2, 3 et figure 17). On peut considérer que ces valeurs caractérisent le sol de l'ensemble du site d'étude. Ce sont les valeurs mesurées sur la plus grande superficie du site.

Conclusion et perspective

Au stade actuel de ce travail, il a été possible de préparer un ensemble cohérent de données pour la mise en œuvre du modèle de ruissellement et d'érosion sur l'aménagement en banquettes du site EG1 de El Gouazine :

- Les paramètres hydro-dynamiques des sols inter-banquettes ont été précisés et mis en relation avec les états de surface et la texture des sols. Il est donc possible de transposer les résultats acquis à l'ensemble des espaces inter-banquettes de ce site. On remarquera que la variabilité des conductivités hydrauliques est faible et dans un premier temps il est possible d'utiliser la valeur médiane des 44 expériences Beerkan mise en œuvre. Les valeurs médiane, moyenne et écart type du k_s caractérisent ce milieu : sol argilo sableux à pellicule de battance sur les versants aménagés du bassin versant l'El Gouazine.
- Le nivellement fin de la zone inter-banquette au tachéomètre laser doit permettre la mise en place du modèle de propagation du ruissellement suivant l'approximation de l'équation de l'onde cinématique. En effet la définition de la topographie du terrain a permis de déterminer les chemins et les caractéristiques du ruissellement superficiel. Il est alors possible d'appliquer l'équation de la continuité et de l'onde cinématique et de produire en chaque point de l'espace inter-banquette l'épaisseur du film d'eau et sa vitesse.
- Les analyses texturales des sols donnent les éléments permettant l'estimation des paramètres de l'équation de la continuité sédimentaire unidimensionnelle. Les résultats de la modélisation de la propagation sont aussi utiles pour avoir le débit liquide en chaque point.

Pour mettre en place complètement le modèle les étapes suivantes restent nécessaires :

- Analyse des données pluviographiques relevées près des banquettes. Ces données existent sur support informatique en temps réel depuis 1997. Il est nécessaire d'en faire une analyse critique, trouver un pas de temps de discrétisation des données d'intensité de pluie compatible avec la modélisation.
- Partager la surface étudiée en unités homogènes du point de vue topographique et production d'eau pour appliquer l'équation de l'onde cinématique. Une expérimentation simple sous pluie naturelle devrait permettre de vérifier les hauteurs de ruissellement sur la parcelle en fonction de l'intensité de la pluie, des micro-capteurs de pression pourraient être utilisés ou des petits repères à lire durant le ruissellement pour comparer avec les y profondeurs de flux (L) calculées.

- Evaluer Q_s décharge des sédiments ($M.L^{-1}.T^{-1}$) en fonction du débit liquide. Il serait intéressant de mener une expérimentation sous pluie simulée pour caler un modèle et de le vérifier sous pluie naturelle.
- Préparer et compléter le fichier de données permettant la validation du modèle. Pour le moment on dispose des dates de remplissage en eau du canal amont. Une validation serait plus aisée si on disposait de l'hydrogramme complet de ruissellement pour quelques événements. Pour valider le module d'érosion, on dispose des séries de topographies donnant le transport solide cumulé suite à plusieurs événements. Des données de transport solide au cours d'un événement pluvieux sont possibles à obtenir en installant un préleveur dans le canal. Il permettrait de construire un turbidigramme (débit solide en fonction du temps) pour quelques événements.

Bien que l'objectif de modélisation du ruissellement et de l'érosion n'ait pas été atteint, ce stage m'a permis de mener une expérimentation intéressante et d'acquérir de nombreuses méthodes d'analyse des processus d'infiltration. Abordant un domaine très nouveau, après des études en agronomie et plus spécialement en agronomie forestière, ce stage m'a ouvert de nombreuses perspectives sur la recherche en conservation des eaux et des sols, thématique jugée prioritaire dans le développement de mon pays, la Syrie. En effet l'université Tichreen dont je dépends m'avait conseillé à m'inscrire au DEA de sciences de l'eau de l'université de Montpellier II dans l'optique de pouvoir travailler sur l'aménagement des bassins versants.

Références

- ACTA – IRD., 2002. *Annuaire hydrologiques des lacs collinaires (2000-2001)*. Réseau pilote de surveillance hydrologique, 175p.
- ALBERGEL J., BOUFAROUA M., NASRI S., PEPIN Y., 2003. Erosion et transport solide dans des petits bassins versants méditerranéens, *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003)* IAHS Pub1. n°. 278. p. 373-379.
- ARNOLD J.B., WALL G., MOORE N., BALDWIN C.S., SHELTON I.J., 1989. *L'érosion du sol – Causes et effets*. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, Ontario (Canada).
- AUZET A.V., 1987. *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture: aspects agronomiques*. CEREG-URA 95 CNRS, Eds.: Ministères de l'environnement et de l'agriculture, 60p.
- BOIVIN P., TOUMA J., ZANTE P., 1987. *Mesure de l'infiltrabilité du sol par la méthode du double anneau*. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol.XXIV, n° 1, 1987 : 17-25.
- CHAMAYOU H., LEGROS J.P., 1989. *Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol*. Presses universitaires de France 593p.
- CONDAPPA D., 2000. *Illustration de la méthode de « Beerkan » en vue de la caractérisation hydrodynamique d'un sol*. Mémoire DEA. Université Joseph Fourier Grenoble I, 48p.
- CASENAVE A., VALENTIN C., 1989 ; *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. Ed. de l'ORSTOM. Col. Didactiques. 229p
- DENIS B., 1988. Guide des analyses courantes en pédologie. INRA, Paris 172p.
- FLORET Ch., PONTANIER R., 1982. *L'aridité en Tunisie présaharienne. Climat, sol, végétation et aménagement*. Travaux et Documents de l'ORSTOM. 544p
- HAVERKAMP R., BOURAOU F., ZAMMIT C., & ANGULO-JARAMILLO R., 1999. *Movement of moisture in the unsaturated zone In the Groundwater Engineering Handbook*, Ed. J. W. Delleur, CRC Press LLC, Boca Raton, USA, chapter 5 : 5.1-5.50.
- HYDROMED (2001). *Rapport final du programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen*. Ed. J. Albergel & S. Nasri. Contrat européen INCO DC ERBIC 18CT 960091 STD4. IRD / INRGREF Tunis, 120p + 6 annexes.
- LE BISSONNAIS Y., MONTIE C., DAROUSSIN J., KING D., 1998. *Cartographie de l'Aléa " érosion des sols " en France*. Collection Etudes et travaux. IFEN, Orléans, 63 pp. (se trouve sur le site web <http://www.ifen.fr/erosion/methsom.htm>)
- MEADE R.H., YUZYK T.R., DAY T.J., 1990. *Movement and storage of sediments in the rivers of the United States and Canada*, in Wolman M.G. and Riggs H.C. (eds) *Surface Water Hydrology*: Boulder, Colorado, Geological Society of America, *Geology of North America*, v. O-1 pp 255-280.

MOUSSA R., 2003. *Modélisation hydrologique spatialisée des crues*. Mémoire de HDR: UMII. 85p.

MANSOURI T., 2001. *Modélisation spatialisée des écoulements et du transport solide des bassins versants des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon*. Thèse de doctorat. Université de Tunis El Manar. 286p.

NASRI S., 2002. *Hydrological effects of water harvesting techniques. A study of tabias, soil contour ridges and hill reservoirs in Tunisia*. Report N 1030 Lund Sweden 2002 76p +5 articles an.

NOUVELOT J.F., 1992. *Erosion mécanique, transport solide, sédimentation dans le cycle de l'eau*. ORSTOM de Montpellier. B.P.5045. 126p.

ROOSE E., 1999. *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau de la biomasse et de la fertilité des sol (GCES)*. Bulletin Pédologique de la FAO n°70. 422p.

SHARDA V.N., SAMRA J.S., 2002. *Hydrological simulation of a conservation bench trease system in a subhumid climate*, Hydrological Sciences –Journal- des Sciences Hydrologiques, 47(4) August P.549-561.

Sites Internet:

<http://europa.eu.int/comm/environment>.

<http://www.goldensoftware.com/products/surfer/surfer.shtml>.

<http://www.mathcad.com>.

www.microsoft.com/office/excel.

Annexe 1 : Exemple du traitement complet par BEST 2 de l'essai (B15)

BEST - ver 0.2 Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters

edited for **Beerkan experiments**

at Tchernobyl_2002

Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement

UMR 5564 CNRS, INPG, IRD, UJF

Grenoble.

Contact :

Rafael ANGULO-JARAMILLO

angulo@hmg.inpg.fr

CONSTANTES DE CALCUL

$TOL \equiv 10^{-6}$ $CTOL \equiv 10^{-6}$

EXPRIMENT CONSTANTS :

$\rho_s \equiv 2.65$ g/cm³ $\gamma \equiv 0.75$ $\beta \equiv 0.6$

Rayon du disque : $r := 74.5$ (mm) Pression imposée : $h_{surf} := 0$ (mm)

Définition de la liste de variables et paramètres à calculer

$Parameters_{<0>} :=$	<pre> "Référence : " "x disk (mm)" "h surf (mm)" "rod (g/cm3)" "teta_0" "teta_S" "M" "N" "M.N" "Dg (µm)" "m" "n" "m.n" "eta" "cp" "S (mm/s1/2)" "Ks (mm/s)" "alfa-I (mm)" "alfa-t (sec)" "alfa-h (mm)" "alfa-teta" "alfa-K" "lambda-teta" "lambda-K" "lambda-h" "x0 (mm)" "z0 (mm)" "hg (mm)" </pre>	<pre> lignes(Parameters) = 28 ip := 0..37 Parameters_ip,0 := Parameters_ip,0 Parameters_28,0 := "alfa_ratio" Parameters_29,0 := "hgpw" Parameters_30,0 := "teta_Rpw" Parameters_31,0 := "hgmw" Parameters_32,0 := "hgmd" Parameters_33,0 := "COMMENTS" Parameters_34,0 := "Y1" Parameters_35,0 := "X0" Parameters_36,0 := "X1" Parameters_37,0 := "X2" Num. de la col de résultats : COL := 1 Parameters_ip,COL := 0 </pre>
-----------------------	--	---

DONNEES EXPERIMENTALES.

Granulométrie mesurée :

Diamètre mm

Fréquence cumulée (%)

Granulometric composition and calculated values of cation exchange capacity (CEC), dry soil density (rd), porosity (m), hydraulic conductivity (Kf) of geologic sediments at Pilot Site, Chernobyl. Analyses are conducted N.A. Partsevskij, data checked out and compiled by A.V. Matoshko (IGS, Kiev).

$$D := \begin{pmatrix} 0.001 \\ 0.011 \\ 0.035 \\ 0.125 \\ 1.1 \end{pmatrix} \quad FF := \begin{pmatrix} 15.46391753 \\ 18.55670103 \\ 21.64948454 \\ 53.60824742 \\ 100 \end{pmatrix} \quad D := D \cdot 1000 \quad FF := \frac{FF}{100}$$

Equation pour passer des fréquences en % à unités

lignes(D) = 5

Experimental measurements:

$\rho_d := 1.5 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

$\theta_0 := 0.11 \text{ (cm}^3\text{/cm}^3\text{)}$

$\theta_s := 0.19 \text{ (cm}^3\text{/cm}^3\text{)}$

$$1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} = 0.434$$

Porosité

Ref_infiltration := "Essai 2 B15-br."

<<< Nom de l'essai 2 B15-

Essai d'infiltration I(t), première col t (sec) et deuxième col. l (mm)

Introduction des données d'infiltration pour l'essai :

	0	0
infiltration :=	412	8.0290769
	962	16.0581538
	1504	24.0872307
	2380	32.1163076
	3172	40.1453845
	3862	48.1744614
	4584	56.2035383
	5582	64.2326152
	6422	72.2616921
	7192	80.290769
	8251	88.3198459

Ref_infiltration = "Essai 2 B15-br."
 Ref_infiltration = "Essai 2 B15-br."
 Parameters_{0,COL} := Ref_infiltration
 Parameters_{1,COL} := 1
 $\rho_d = 1.5 \text{ g/cm}^3$
 Parameters_{2,COL} := h_{surf}
 $\theta_0 = 0.11 \text{ (cm}^3\text{/cm}^3\text{)}$
 Parameters_{3,COL} := ρ_d
 Parameters_{4,COL} := θ_0
 $\theta_s = 0.19 \text{ (cm}^3\text{/cm}^3\text{)}$
 Parameters_{5,COL} := θ_s

lignes(infiltration) = 12

Durée de l'essai: $\frac{\text{infiltration}_{\text{lignes(infiltration)-1,0}}}{60} = 137.5167 \text{ (minutes)}$

Lame infiltrée: $\text{infiltration}_{\text{lignes(infiltration)-1,1}} = 88.3198 \text{ (mm)}$

OPTIMISATION DE F(D) ; CALCUL DES PARAMETRES DE FORME et de c_p

$$D = \begin{pmatrix} 1 \\ 11 \\ 35 \\ 125 \\ 1.1 \times 10^3 \end{pmatrix} \quad \text{Diamètre } \mu\text{m} \quad FF = \begin{pmatrix} 0.1546 \\ 0.1856 \\ 0.2165 \\ 0.5361 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{Fréquence cumulée}$$

N_{granulo} := lignes(D)

N_{granulo} = 5

Changement de variable pour avoir un point d'inflexion sur F(D), Di=1/D

j := 0..N_{granulo} - 1

$$Di_j := \frac{1}{D_j \cdot 10^{-4}}$$

$$xDi_j := Di_j$$

$$yF_j := FF_j$$

Vecteur de donnees

$$F(x, a) \equiv \begin{pmatrix} \left[1 + \left(\frac{x}{a_0} \right)^{a_1} \right]^{\frac{2}{a_1} - 1} \\ \frac{a_1 - 2}{a_0} \cdot \left[1 + \left(\frac{x}{a_0} \right)^{a_1} \right]^{\frac{2}{a_1} - 2} \cdot \left(\frac{x}{a_0} \right)^{a_1} \\ \left[1 + \left(\frac{x}{a_0} \right)^{a_1} \right]^{\left(\frac{2}{a_1} - 1 \right)} \cdot \left[\frac{-2}{(a_1)^2} \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{x}{a_0} \right)^{a_1} \right] + \left(\frac{2}{a_1} - 1 \right) \cdot \left(\frac{x}{a_0} \right)^{a_1} \cdot \frac{\ln \left(\frac{x}{a_0} \right)}{\left[1 + \left(\frac{x}{a_0} \right)^{a_1} \right]} \right] \end{pmatrix}$$

$$vg := \begin{pmatrix} 10 \\ 3 \end{pmatrix}$$

P := ajustgen(xDi, yF, vg, F)

$$P = \begin{pmatrix} 18.7184 \\ 2.4519 \end{pmatrix}$$

Paramètres de la courbe granulométrique

$$N := P_1 \quad M := 1 - \frac{2}{N} \quad Dig := P_0 \quad M = 0.1843 \quad N = 2.452 \quad Dig = 18.7184 \quad Dg := \frac{10^4}{Dig}$$

$$Dg = 534.2325 \quad \mu\text{m}$$

$$M \cdot N = 0.4519$$

Vecteurs pour récupérer les données pour un tableau

Parameters_{6, COL} := M

Parameters_{9, COL} := Dg

Parameters_{7, COL} := N

Parameters_{8,COL} := M · N

RESUME DES CALCULS - Granulométrie, paramètres de forme et cp.

Granulo

M = 0.1843

N = 2.4519

M · N = 0.4519

Dg = 534.2325

μm

Calcul 1. F10(D).mcd

Calcul 2. Isabelle

Calcul 3. Carlos

m = 0.1099

m_{isa} = 0.0835

m_{car} = 0.1099

n = 2.247

n_{isa} = 2.1822

n_{car} = 2.247

m · n = 0.247

m_{isa} · n_{isa} = 0.1822

m_{car} · n_{car} = 0.247

η = 10.0678

η_{isa} = 14.1831

η_{car} = 12.3816

c_p = 2.4337

c_{pisa} = 2.3398

c_{pcar} = 2.0368

Valeurs retenues pour la suite

m := m

Parameters_{10,COL} := m

n := n

Parameters_{11,COL} := n

m · n = 0.247

Parameters_{12,COL} := m · n

η := η

Parameters_{13,COL} := η

c_p := c_p

Parameters_{14,COL} := c_p

Représentations graphiques et calcul du RMSE :

$$F(D) := \left[1 + \left(\frac{Dg}{D} \right)^N \right]^{-M}$$

$$Fc_j := F(D_j)$$

Fréquence calculée

$$RMSE := \sqrt{\sum_{j=0}^{N_{granulo}-1} \frac{(FF_j - Fc_j)^2}{N_{granulo}}}$$

$$RMSE = 5.705 \times 10^{-2}$$

NL := 100

jj := 1 .. NL

$$Dc_{jj} := 10^{\log(0.1) + \frac{jj}{100} \cdot \log\left(\frac{5000}{0.1}\right)}$$

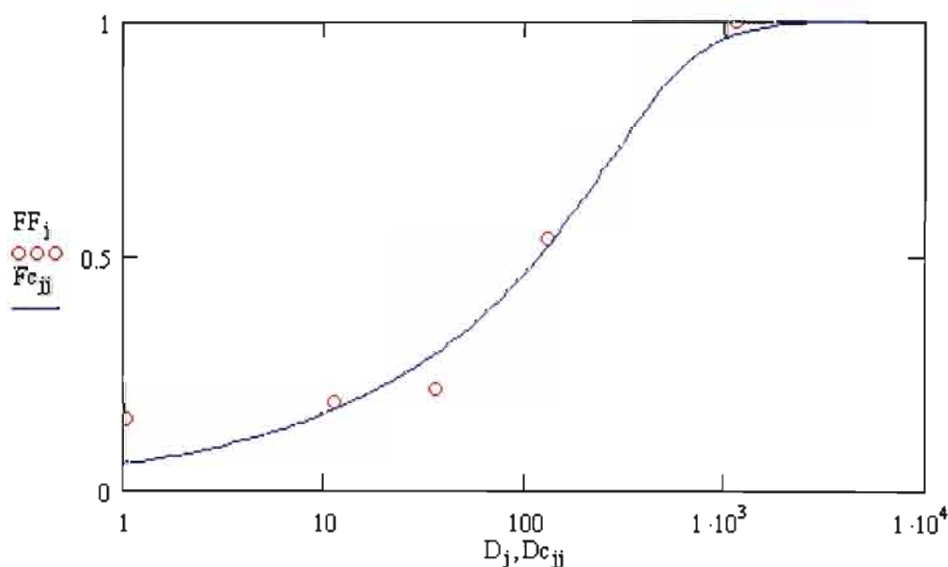
$$Fc_{jj} := F(Dc_{jj})$$

M = 0.1843

N = 2.4519

M · N = 0.4519

Dg = 534.2325 μm



RMSE = 0.0571

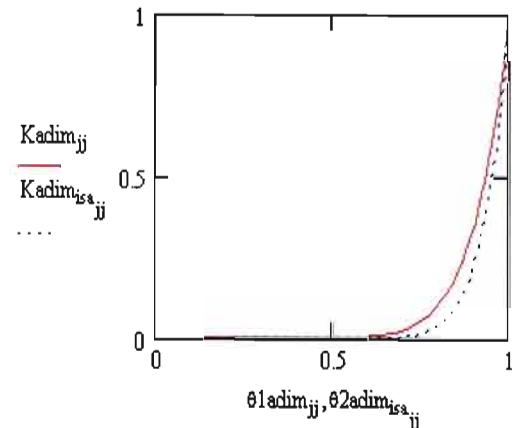
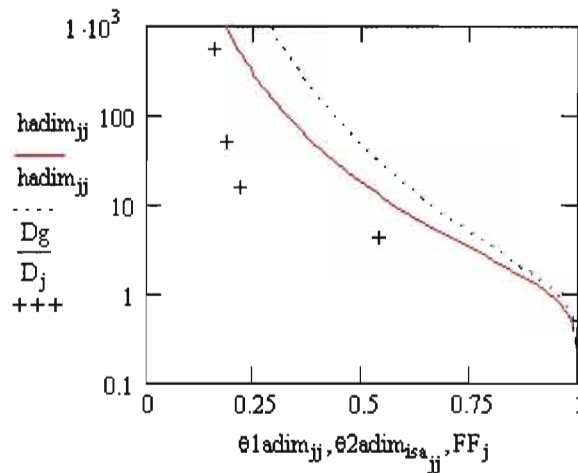
Tracé de courbes adimensionnelles h(q) et K(q) et comparaison avec les données de granulométrie

NL := 100

jj := 1..NL

$$\text{hadim}_{jj} := 10^{\log(0.1) + \frac{jj}{100} \cdot \log\left(\frac{5000}{0.1}\right)} \quad \theta 1 \text{adim}_{jj} := \left[1 + (\text{hadim}_{jj})^n\right]^{-m}$$

$$\theta 2 \text{adim}_{isa_{jj}} := \left[1 + (\text{hadim}_{jj})^{n_{isa}}\right]^{-m_{isa}} \quad K \text{adim}_{jj} := (\theta 1 \text{adim}_{jj})^\eta \quad K \text{adim}_{isa_{jj}} := (\theta 2 \text{adim}_{isa_{jj}})^{\eta_{isa}}$$



AJUSTEMENT DE L'EQUATION INFILTRATION 3D avec Kini différent de 0.

Rappel des données et constantes d'entrée :

t := infiltration^{<0>}

Temps (sec)

I := infiltration^{<1>}

Infiltration cumulée (mm)

Ninf := lignes(t)

Ninf = 12

$\theta_s = 0.19$

$\theta_0 = 0.11$

$\Delta\theta := \theta_s - \theta_0$

$\Delta\theta = 0.08$

$r = 74.5$

$\gamma = 0.75$

$\beta = 0.6$

$h_{surf} = 0$

$\eta = 10.0678$

$c_p = 2.4337$

DONNEES d'Infiltration et calcul des flux

i := 0..Ninf - 1

$X_i := t_i$

$Y_i := I_i$

Flux

k := 0..Ninf - 2

$$qX_k := \frac{1}{2} \cdot (X_k + X_{k+1})$$

$$qY_k := \frac{Y_{k+1} - Y_k}{X_{k+1} - X_k}$$

$$q2X_k := qX_k$$

$$q2Y_k := \frac{Y_{k+1} - Y_k}{\sqrt{X_{k+1}} - \sqrt{X_k}}$$

Dérivée par rapport à racine de t

FONCTIONS D'OPTIMISATION : on utilise l'éq. D'infiltration analytique 3D de Smettem et al. 1992. On ne considère que la somme des écarts au carré.

$$a := \frac{\gamma}{r \cdot \Delta\theta}$$

$$b1 := \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta$$

$$b2 := \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta + \frac{2 - \beta}{3} \cdot \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta\right]$$

$$a = 0.12584$$

$$b1 = 4.0766 \times 10^{-3}$$

$$b2 = 0.4688$$

Lame d'eau :

$$j := 0..Ninf - 1$$

$$SSQI(S, Ks) := \sum_j \left[\left| Y_j - \left(S \cdot \sqrt{X_j} + a \cdot S^2 \cdot X_j + b2 \cdot Ks \cdot X_j \right) \right| \right] \quad SSQq(S, Ks) := \sum_{jq} \left[\left| \{qY_{jq}\} - \left[\frac{1}{2} \cdot S \cdot \{qX_{jq}\}^{-0.5} + a \cdot S^2 + b2 \cdot Ks \right] \right| \right]$$

Flux :

$$Nq = 11$$

$$Nq := Ninf - 1$$

$$jq := 0 \dots (Nq - 1)$$

$$SSQlogq(S, Ks) := \sum_{jq} \left[\left| \log(\{qY_{jq}\}) - \log \left[\frac{1}{2} \cdot S \cdot \{qX_{jq}\}^{-0.5} + a \cdot S^2 + b2 \cdot Ks \right] \right| \right]$$

En plus des deux fonctions précédentes, je considère le flux permanent sur les Nfin derniers intervalles de mesure (éq. aux temps longs sur les 5 derniers points de mesure). Cela n'est pas toujours le cas lorsque l'essai ne c'est pas poursuivi suffisamment longtemps, et que les derniers points ne sont pas trop alignés.

Flux asymptotique :

$$Nfin := 7$$

$$jf := (Ninf - Nfin - 1) \dots (Ninf - 2)$$

$$SSQf(S, Ks) := \left[\left| \frac{\sum_{jf} qY_{jf}}{Nfin} - \{a \cdot S^2 + Ks\} \right| \right]^2$$

Lame d'eau pour temps longs :

$$Ntl := Nfin$$

$$jl := (Ninf - Ntl) \dots (Ninf - 1)$$

$$SSQl(S, Ks) := \sum_{jl} \left[\left| Y_{jl} - \left[\{a \cdot S^2 + Ks\} \cdot X_{jl} + \frac{S^2 \cdot \ln\left(\frac{1}{\beta}\right)}{2 \cdot Ks \cdot (1 - b1) \cdot (1 - \beta)} \right] \right| \right]^2$$

PROCEDURE D'OPTIMISATION

1). Recherche des meilleurs limites pour contrôler le domaine d'optimisation :

$$S := 0$$

$$SSQqS(S) := SSQq(S, 0)$$

Calcul de S uniquement par le flux, avec Ks=0 (c.à d. que l'infiltration n'est expliquée que par la sorptivité).

Soit

$$SSQqS(S) = 0$$

$$So := \text{Minem}(S)$$

$$So = 0.26022$$

$$Ks := \text{TOL}$$

$$SSQfK(Ks) := SSQf(0, Ks)$$

La valeur de Ks est calculée en supposant que S=0 (c.à d. qu'aux temps longs l'infiltration n'est expliquée que par une valeur maxi de Ks). Cette valeur est utilisée ensuite pour définir la valeur maxi de Ks.

Soit

$$SSQfK(Ks) = 0$$

$$Kso := \text{Minem}(Ks)$$

$$Kso = 9.78677 \times 10^{-3}$$

Cette valeur est en réalité celle de $aS^2 + Ks$

2). Optimisation de S et de Ks

$$S := 0$$

$$Ks := 0$$

Guess values : comparer ces valeurs à celles calculées en 1). ci-dessus.

Soit

$$0 < S < So$$

$$0 < Ks < Kso$$

$$SSQI(S, Ks) = 0$$

$$SSQq(S, Ks) = 0$$

$$SSQl(S, Ks) = 0$$

$$a \cdot S^2 + Ks \leq Kso$$

$$\begin{pmatrix} S \\ Ks \end{pmatrix} := \text{Minem}(S, Ks)$$

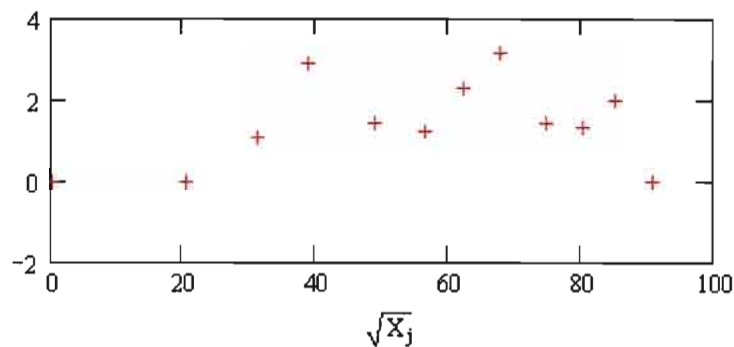
$$\begin{pmatrix} S \\ Ks \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2304 \\ 3.1875 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$Ks := \text{si}(Ks < 0, 0, Ks)$$

$$a \cdot S^2 + Ks = 9.8654 \times 10^{-3}$$

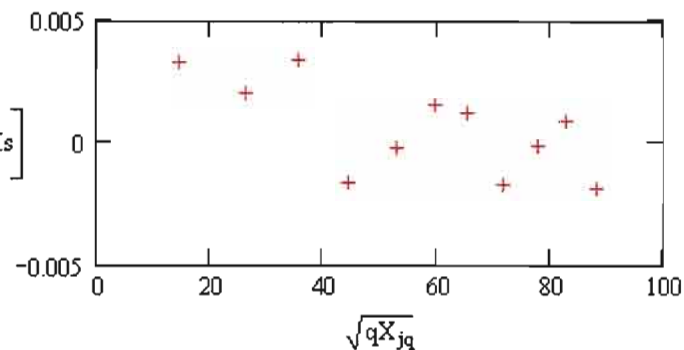
$$Y_j - \left(S \cdot \sqrt{X_j} + a \cdot S^2 \cdot X_j + b2 \cdot Ks \cdot X_j \right)$$

+++



$$qY_{jq} - \left[\frac{1}{2} \cdot S \cdot (qX_{jq})^{-0.5} + a \cdot S^2 + b2 \cdot Ks \right]$$

+++



$$\sqrt{\frac{SSQI(S, Ks)}{Ntl}} = 1.8919$$

$$\sqrt{\frac{SSQI(S, Ks)}{Ninf}} = 1.7245$$

$$\sqrt{\frac{SSQq(S, Ks)}{Nq}} = 1.9076 \times 10^{-3}$$

$$\sqrt{\frac{SSQf(S, Ks)}{Nfin}} = 2.9727 \times 10^{-5}$$

Résultats d'optimisation :

$$S = 0.23036 \text{ (mm.s}^{-0.5}\text{)}$$

$$\text{Parameters}_{15, \text{COL}} := S$$

$$\text{Parameters}_{16, \text{COL}} := Ks$$

$$Ks = 3.187 \times 10^{-3} \text{ (mm/s)}$$

$$\delta := \frac{\gamma \cdot S^2}{r \cdot \Delta \theta}$$

$$\delta = 6.6779 \times 10^{-3} \text{ (mm/s)}$$

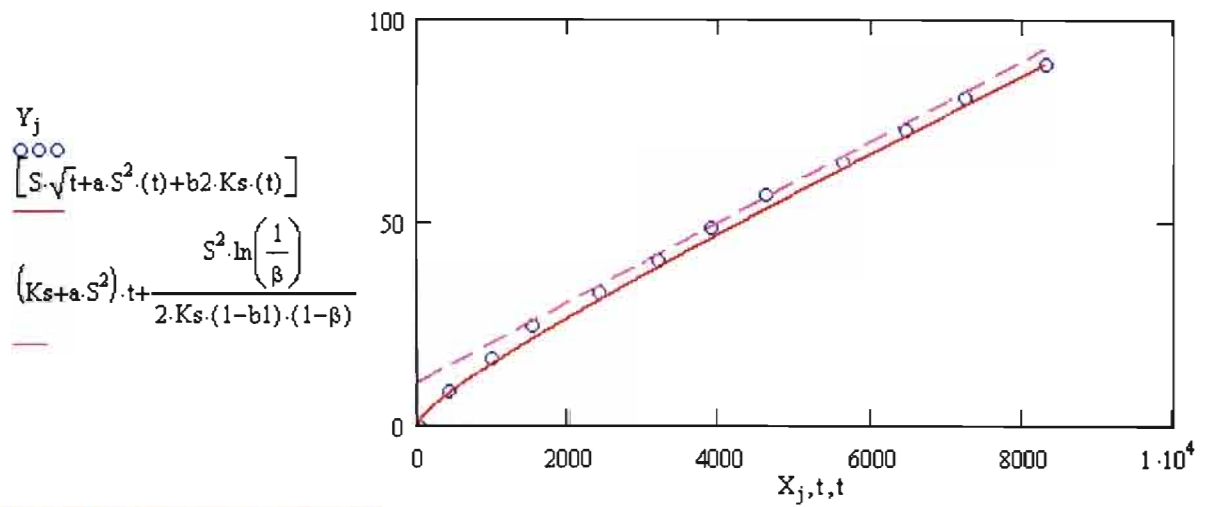
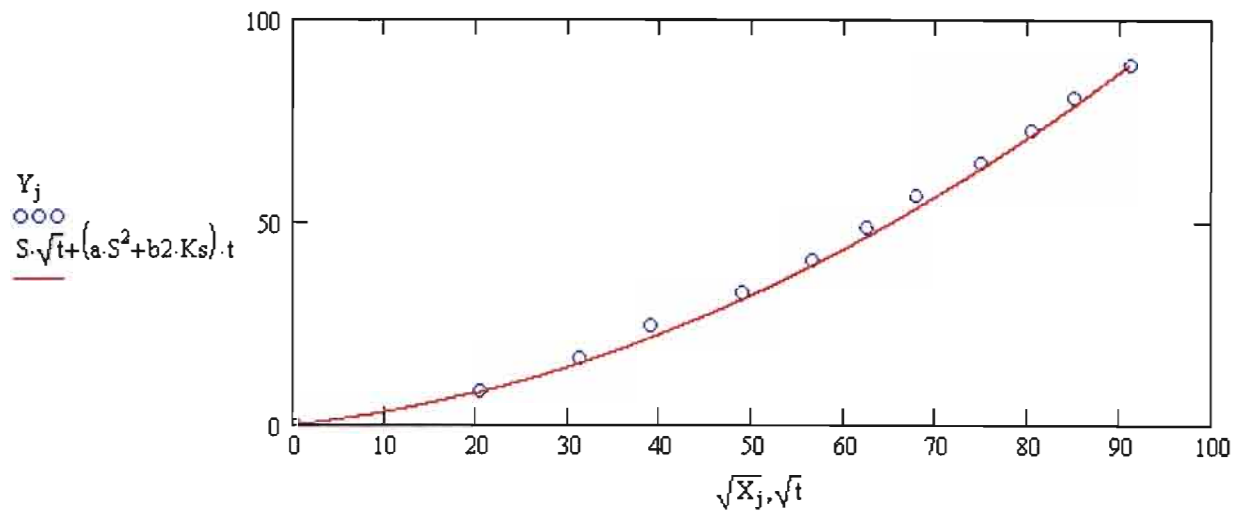
$$Ks \cdot \frac{3600}{10} = 1.1475 \text{ (cm/h)}$$

$$Ks \cdot \frac{3600 \cdot 24}{1000} = 0.2754 \text{ (m/j)}$$

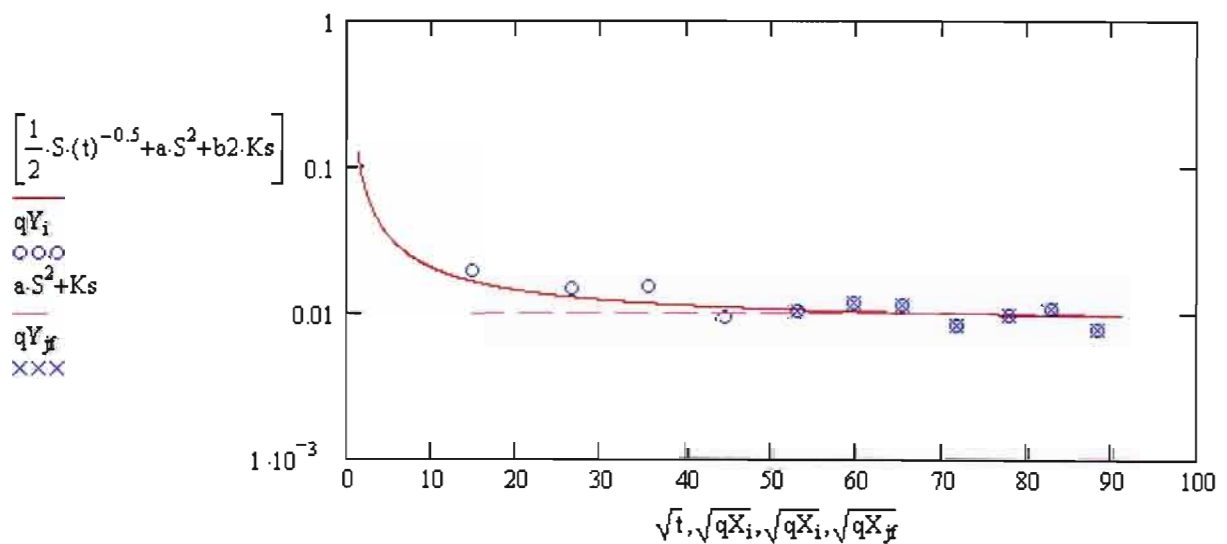
$$Ks \cdot \frac{86400 \cdot 365}{1000} = 100.5207 \text{ (m/an)}$$

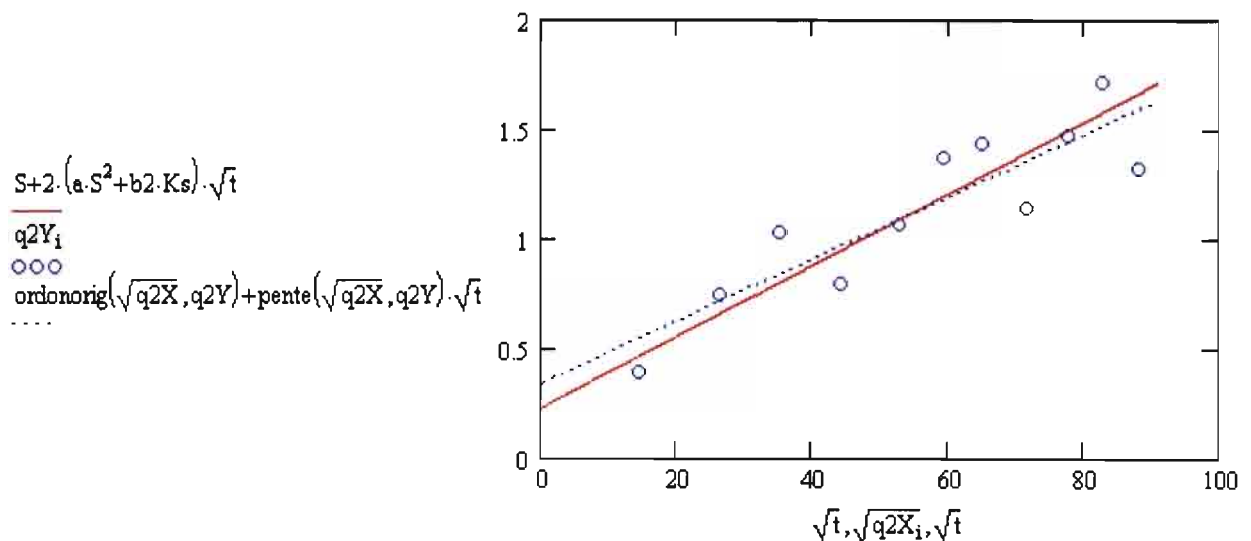
$$t := 0, 1 \dots X_{Ninf-1}$$

Ref_infiltration = "Essai 2 B15-br-"



Ref_infiltration = "Essai 2 B15-br-"





Sorptivité à partir de $dl/dsqr(t)$:

Pente de la droite $dl/dsqr(t)$

et calcul de K_s :

$$\text{penet}(\sqrt{q2X}, q2Y) = 0.0143$$

$$\text{ordonorig}(\sqrt{q2X}, q2Y) = 0.3421$$

$$\frac{\left(\frac{\text{penet}(\sqrt{q2X}, q2Y)}{2} - a \cdot \text{ordonorig}(\sqrt{q2X}, q2Y)^2 \right)}{b2} = -0.0162$$

Pente avec les valeurs S , et K_s optimisées :

$$S = 0.2304$$

$$K_s = 3.1875 \times 10^{-3}$$

La pente est :

$$2 \cdot (a \cdot S^2 + b2 \cdot K_s) = 0.0163$$

CALCUL DES LONGUEURS ET TEMPS CARACTERISTIQUES

Paramètres White et Sully (1987), et Stéphanie Roulier

$$t_{\text{grav}} := \left(\frac{S}{K_s} \right)^2 \quad t_{\text{grav}} = 5.2231 \times 10^3 \text{ sec}$$

$$t_{\text{geom}} := \left(\frac{r \cdot \Delta\theta}{S} \right)^2 \quad t_{\text{geom}} = 669.3694 \text{ sec}$$

$$\lambda_c := 0.55 \cdot \frac{S^2}{K_s \cdot \Delta\theta} \quad \lambda_c = 114.4591 \text{ mm}$$

$$\lambda_m := \left(\frac{73 \cdot 10^{-3}}{10^3 \cdot 9.81} \cdot \frac{1}{\lambda_c \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 10^3 \quad \lambda_m = 0.065 \text{ mm}$$

$$t_{\text{geomod}} := \left(\frac{r \cdot \Delta\theta}{\gamma \cdot S} \right)^2$$

$$t_{\text{geomod}} = 1.19 \times 10^3 \text{ (sec)}$$

$$t_{\text{stab}} := \left(\frac{S}{K_s + \frac{\gamma \cdot S^2}{r \cdot \Delta\theta}} \right)^2$$

$$t_{\text{stab}} = 545.2499 \text{ (sec)}$$

$$t_{\text{cap}} := \frac{\Delta\theta \cdot \lambda_c}{K_s}$$

$$t_{\text{cap}} = 2.8727 \times 10^3 \text{ (sec)}$$

Paramètres Haverkamp et al. (1999).

$$\alpha I := \text{si} \left(K_s = 0, "N.C.", \frac{S^2}{c_p \cdot K_s} \right)$$

$$\alpha l = 6.8409 \text{ mm}$$

$$\text{Parameters}_{17, \text{COL}} := \alpha l$$

$$\alpha t := \text{si} \left(Ks = 0, "N.C.", \frac{S^2}{c_p \cdot Ks^2} \right)$$

$$\alpha t = 2.1462 \times 10^3 \text{ Sec}$$

$$\text{Parameters}_{18, \text{COL}} := \alpha t$$

$$\alpha h := \text{si} \left(Ks = 0, "N.C.", \frac{S^2}{c_p \cdot \Delta \theta \cdot Ks} \right)$$

$$\alpha h = 85.5112 \text{ mm}$$

$$\text{Parameters}_{19, \text{COL}} := \alpha h$$

$$\alpha \theta := \Delta \theta$$

$$\alpha \theta = 0.08$$

Attention ! Pour le calcul de lh, ci dessous, la sorptivité calculée S0 (0,qs) est calculées avec l'approximation de l'annexe 2 du DEA de Deva.

rapport S0/S:

$$S0 := \sqrt{\frac{\frac{\theta_s}{\Delta \theta} \cdot \frac{Ks}{Ks \cdot \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right]}}{S}} \cdot S$$

$$S0 = 0.3557 \text{ (mm/s}^{1/2}\text{)}$$

$$\sqrt{\frac{\frac{\theta_s}{\Delta \theta} \cdot \frac{Ks}{Ks \cdot \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right]}}{S}} = 1.5443$$

$$S = 0.2304$$

$$\lambda h := \text{si} \left(Ks = 0, "N.C.", \frac{S0^2}{c_p \cdot \theta_s \cdot Ks} \right)$$

$$\lambda h = 85.8612$$

$$\text{Parameters}_{24, \text{COL}} := \lambda h \text{ (mm)}$$

Specific pore radius (Angulo-Jaramillo et al. 2002)

$$\xi m := \text{si} \left(Ks = 0, "N.C.", \left(\frac{73 \cdot 10^{-3}}{10^3 \cdot 9.81} \cdot \frac{1}{\alpha h \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 10^3 \right)$$

$$\xi m = 0.087 \text{ (mm)}$$

$$\text{Parameters}_{25, \text{COL}} := \xi m$$

Dynamical pore structure indicator :

$$\zeta m := \text{si} \left(Ks = 0, "N.C.", \left(\frac{73 \cdot 10^{-3}}{10^3 \cdot 9.81} \cdot \frac{1}{\lambda h \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 10^3 \right)$$

$$\zeta m = 0.0867$$

$$\text{(mm)}$$

$$\text{Parameters}_{26, \text{COL}} := \zeta m$$

Paramètre de normalisation de la courbe de rétention d'eau

$$\text{Parameters}_{20, \text{COL}} := \alpha \theta$$

$$\alpha K := Ks \cdot \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right]$$

$$\alpha K = 3.1745 \times 10^{-3} \text{ (mm/s)}$$

$$\text{Parameters}_{21, \text{COL}} := \alpha K$$

$$\lambda \theta := \theta_s$$

$$\lambda \theta = 0.19$$

$$\text{Parameters}_{22, \text{COL}} := \lambda \theta$$

$$\lambda K := Ks$$

$$\lambda K = 3.1875 \times 10^{-3} \text{ (mm/s)}$$

$$\text{Parameters}_{23, \text{COL}} := \lambda K$$

$$\Delta K := Ks \cdot \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right]$$

$$\Delta K = 3.1745 \times 10^{-3}$$

$$hg := \text{si} \left(Ks = 0, "N.C.", \frac{1}{c_p} \cdot \left(\frac{Ks \cdot h_{\text{surf}}}{\Delta K} - \frac{\alpha l}{\Delta \theta} \right) \right)$$

$$hg = -35.1365 \text{ (mm)}$$

$$hg_{\text{corrigé}} := \frac{2 \cdot Ks \cdot h_{\text{surf}}}{c_p \cdot \Delta K} - \frac{S^2}{c_p \cdot \Delta K \cdot \Delta \theta}$$

$$hg_{\text{corrigé}} := \frac{2 \cdot K_s \cdot h_{\text{surf}}}{c_p \cdot \Delta K} - \frac{\alpha l}{\Delta \theta}$$

ERREUR dans la formule précédente !!!!

$$hg_{\text{corrigé}} = -85.5112$$

$$hg \cdot c_p = -85.5112$$

Si $h_{\text{surf}}=0$ la correction peut être faite en multipliant hg par c_p

$$hg := hg_{\text{corrigé}}$$

$$\text{Parameters}_{27, \text{COL}} := hg$$

$$\alpha_{\text{VG}} := \frac{1}{hg}$$

$$\alpha_{\text{VG}} = -0.0117 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$$

Rappel: Toutes les différentes sorptivités, on retrouve bien S_0 calculé ci-dessus

(expressions de l'annexe du DEA de Deva)

C'est la valeur S optimisée à partir de l'essai d'infiltration

- expérimentale:

$$S_{\text{expe}} := \sqrt{2 \cdot K_s \cdot \Delta \theta \cdot h_{\text{surf}} - c_p \cdot \Delta K \cdot \Delta \theta \cdot hg}$$

$$S_{\text{expe}} = 0.2299 \text{ - de } q_{\text{ini}} \text{ à } q_s:$$

$$S_{\text{reduit}} := \sqrt{-c_p \cdot \Delta K \cdot \Delta \theta \cdot hg}$$

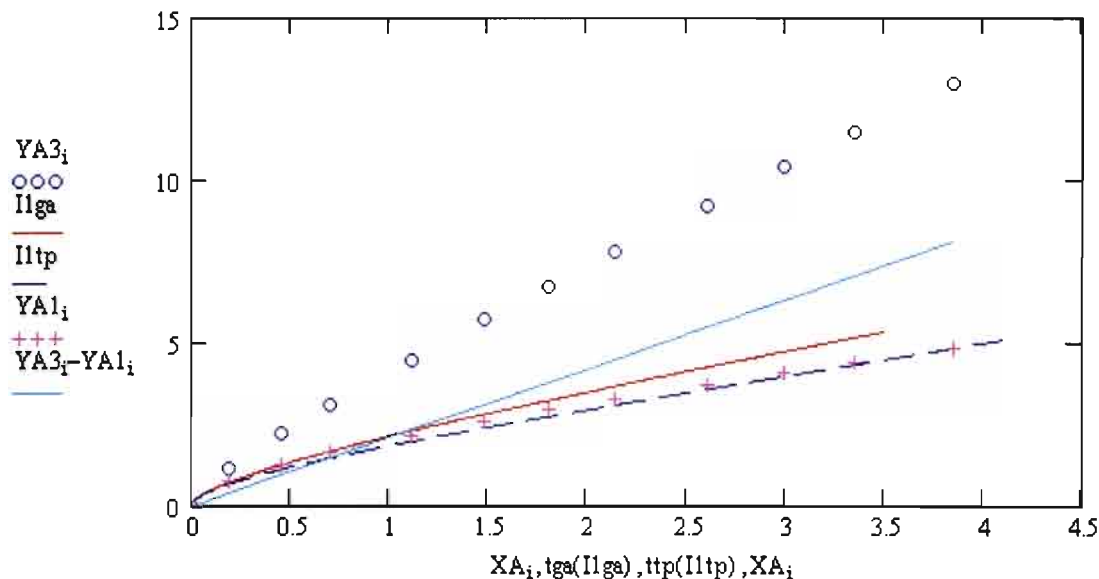
$$S_{\text{reduit}} = 0.2299 \text{ (mm} \cdot \text{s}^{-0.5}\text{) - de } 0 \text{ à } q_s:$$

$$S_{\text{base}} := \sqrt{-c_p \cdot K_s \cdot \theta_s \cdot hg}$$

$$S_{\text{base}} = 0.355 \text{ (mm} \cdot \text{s}^{-0.5}\text{)}$$

CALCUL DE LA FORME DU BULBE D'INFILTRATION (Smettem et al., 1995)

ADIMENSIONALISATION :



Ref_infiltration = "Essai 2 B15-br"

HYSTERESIS

Résultats de BEST : Caractéristiques hydrodynamiques avec hystérésis

Tracé des caractéristiques $h(q)$ et $K(q)$

NL := 100

$j1 := 1,5 \dots -h_{stpW}$

$j2 := 1,5 \dots 100000$

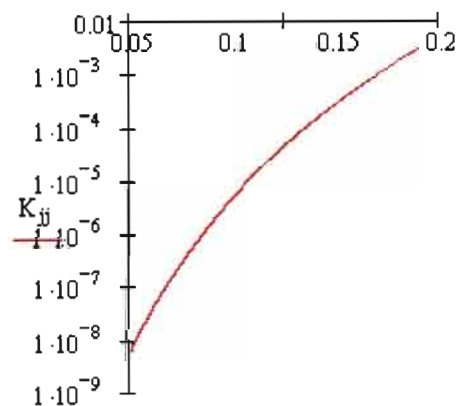
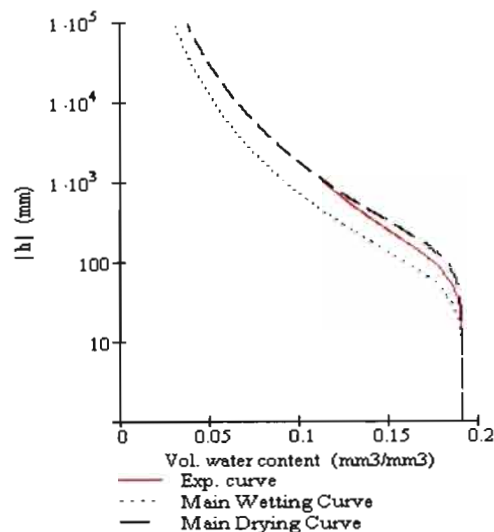
$h_{jj} := j2$

$$\theta_{1jj} := (\theta_s - \theta_{rpw}) \cdot \left[1 + \left(\frac{h_{jj}}{|h_{gpw}|} \right)^n \right]^{-m} + \theta_{rpw}$$

$$\theta_{mw_{jj}} := \theta_s \cdot \left[1 + \left(\frac{h_{jj}}{|h_{gmw}|} \right)^n \right]^{-m}$$

$$K_{jj} := K_s \cdot \left(\frac{\theta_{1jj}}{\theta_s} \right)^\eta$$

$$\theta_{md_{jj}} := \theta_s \cdot \left[1 + \left(\frac{h_{jj}}{|h_{gmd}|} \right)^n \right]^{-m}$$



θ_{1jj}

h in mm WC

K in mm/s

$h_{gpw} = -85.5112$

$K_s = 3.1875 \times 10^{-3}$

BEST's results

Parameters_{33,COL} := si($K_s = 0$, "Ks < 0, problème", "O.K.")

Entrez un commentaire sur votre avis d'expert concernant l'optimisation de cet essai.

	0	1
0	"Référence : "	"Essai 2 B15-br"
1	"r disk (mm)"	74.5
2	"hsurf (mm)"	0
3	"rod (g/cm3)"	1.5
4	"teta_0"	0.11
5	"teta_S"	0.19
6	"M"	0.1843
7	"N"	2.4519
8	"M.N"	0.4519
9	"Dg (µm)"	534.2325
10	"m"	0.1099
11	"n"	2.247
12	"m.n"	0.247
13	"eta"	10.0678
14	"cp"	2.4337
15	"S (mm/s/2)"	0.2304
16	"Ks (mm/s)"	3.1875·10 ⁻³
17	"alfa-l (mm)"	6.8409
18	"alfa-t (sec)"	2.1462·10 ³
19	"alfa-h (mm)"	85.5112
20	"alfa-teta"	0.08
21	"alfa-K"	3.1745·10 ⁻³
22	"lambda-teta"	0.19
23	"lambda-K"	3.1875·10 ⁻³
24	"lambda-h"	85.8612
25	"xm (mm)"	0.087
26	"zm (mm)"	0.0867
27	"hg (mm)"	-85.5112
28	"alfa_ratio"	2.4441
29	"hgpw"	-85.5112
30	"teta_R pw"	0.0217
31	"hgmw"	-52.2731
32	"hgmd"	-127.7632
33	"COMMENTS"	"O.K."
34	"Y1"	261.5632
35	"X0"	-119.3867
36	"X1"	23.8773
37	"X2"	143.2641
38		

Parameters =

Annexe 2 : L'humidité initiale, l'humidité à saturation et la densité apparente, dans les essais Beerkan

Beerkan N°	θ_i %	θ_f %	Densité
BC1	10,88	29,66	1,51
BC2	6,21	21,00	1,50
BC3	16,15	30,74	1,54
BC4	10,56	22,93	1,52
BC5	14,04	33,28	1,32
BC6	16,32	30,95	1,26
BC7	14,56	27,70	1,50
B11	11,09	15,57	1,56
B12	11,93	15,66	1,55
B13	11,31	19,60	1,46
B14	12,19	49,76	1,44
B15	11,96	19,22	1,51
B21	11,31	19,19	1,45
B21S	5,87	38,50	1,50
B22	11,93	16,66	1,58
B22S	5,50	32,84	1,50
B23	10,69	16,78	1,56
B24	13,69	18,40	1,55
B25	11,96	19,22	1,44
B31	10,22	16,26	1,56
B31S	9,29	20,38	1,51
B32	9,37	20,78	1,48
B33	11,64	19,35	1,40
B34	11,65	19,05	1,46
B41	10,01	23,99	1,40
B42	10,50	12,66	1,52
B43	8,74	26,02	1,40
B44	8,06	22,10	1,45
B45	9,26	10,21	1,43
B51	10,66	23,71	1,43
B52	9,29	19,71	1,44
B53	8,68	15,66	1,41
B54	7,45	22,79	1,49
B61	21,03	43,26	1,24
B62	20,81	33,29	1,36
B63	10,47	20,78	1,24
B64	8,00	21,26	1,43
B71	12,69	23,34	1,33
B72	8,05	22,30	1,41
B73	7,71	23,59	1,30
B74	10,90	26,37	1,37
B75	8,42	30,46	1,41
B81	7,26	20,12	1,35
B82	7,66	20,36	1,30
B83	9,24	22,89	1,26
B91	8,35	24,26	1,45
B92	6,23	21,40	1,57

Annexe 3 : Les coordonnées des sites des essais d'infiltration.

Beerkan N°	X	Y	Z
BC1	1009,25	1001,59	9,85
BC2	1022,48	999,96	9,76
BC3	1043,00	1000,23	9,63
BC4	1047,13	1001,85	9,72
BC5	1101,43	994,89	10,17
BC6	1100,62	984,37	10,25
BC7	1096,00	976,11	10,01
B11	1011,05	1008,68	10,64
B12	1015,93	1022,47	11,50
B13	1022,87	1039,06	11,87
B14	1029,25	1059,25	12,62
B15	1035,23	1078,78	13,63
B21	1023,45	1008,45	10,69
B21S	1027,45	1007,45	10,69
B22	1031,48	1023,92	11,71
B22S	1035,48	1022,92	11,71
B23	1039,92	1042,19	12,78
B24	1048,78	1059,75	13,55
B25	1058,39	1078,70	14,66
B31	1041,77	1015,36	11,10
B31S	1037,99	1014,16	11,08
B32	1050,82	1033,40	12,61
B33	1062,22	1049,65	13,72
B34	1073,93	1065,30	14,91
B41	1063,96	1009,64	10,57
B42	1067,38	1025,66	11,81
B43	1071,30	1034,65	12,48
B44	1075,06	1043,85	13,34
B45	1081,69	1058,25	14,56
B51	1079,15	1012,43	10,84
B52	1085,94	1026,69	12,15
B53	1091,49	1035,89	13,08
B54	1095,41	1044,55	13,80
B61	1094,40	1002,38	10,78
B62	1101,70	1011,30	11,91
B63	1115,50	1026,36	14,43
B64	1123,62	1034,82	15,20
B71	1109,55	996,43	10,64
B72	1120,73	1004,70	12,31
B73	1130,68	1010,17	13,18
B74	1138,55	1015,82	13,91
B75	1146,65	1021,18	14,72
B81	1124,32	991,74	12,14
B83	1159,50	1001,26	14,49
B91	1108,79	975,32	11,44
B92	1137,90	986,01	12,91

Annexe 4 : La granulométrie du sol dans les sites des essais d'infiltration.

Essai N°	% argile <2 µ	% limon fin 2-20 µ	% limon grossier 20-50 µ	% sable fin 50-200 µ	% sable grossier 200-2000 µ	Total%
BC1	25,00	7,00	2,00	23,00	43,00	100,00
BC2	10,00	3,00	2,00	31,00	54,00	100,00
BC3	27,08	5,21	2,08	21,88	43,75	100,00
BC4	43,88	16,33	2,04	18,37	19,39	100,00
BC5	22,68	3,09	1,03	14,43	58,76	100,00
BC6	25,25	9,09	2,02	31,31	32,32	100,00
BC7	13,27	3,06	2,04	36,73	44,90	100,00
B11	16,16	2,02	1,01	27,27	53,54	100,00
B12	13,13	3,03	2,02	32,32	49,49	100,00
B13	13,13	4,04	3,03	34,34	45,45	100,00
B14	16,33	5,10	3,06	30,61	44,90	100,00
B15	15,46	3,09	3,09	31,96	46,39	100,00
B21	12,37	2,06	17,53	21,65	46,39	100,00
B21S	12,87	1,98	1,98	30,69	52,48	100,00
B22	13,86	4,95	1,98	35,64	43,56	100,00
B22S	14,85	3,96	0,99	21,78	58,42	100,00
B23	10,20	4,08	3,06	44,90	37,76	100,00
B24	15,15	6,06	3,03	35,35	40,40	100,00
B25	16,33	6,12	3,06	28,57	45,92	100,00
B31	13,86	2,97	1,98	28,71	52,48	100,00
B31S	7,14	1,02	2,04	38,78	51,02	100,00
B32	16,16	3,03	2,02	30,30	48,48	100,00
B33	17,17	5,05	3,03	36,36	38,38	100,00
B34	15,46	6,19	4,12	31,96	42,27	100,00
B41	18,00	8,00	4,00	31,00	39,00	100,00
B42	16,49	8,25	1,03	35,05	39,18	100,00
B43	20,20	5,05	3,03	28,28	43,43	100,00
B44	15,31	6,12	4,08	28,57	45,92	100,00
B45	18,37	12,24	3,06	25,51	40,82	100,00
B51	18,81	7,92	3,96	30,69	38,61	100,00
B52	16,00	5,00	4,00	33,00	42,00	100,00
B53	17,82	6,93	3,96	29,70	41,58	100,00
B54	19,59	11,34	6,19	28,87	34,02	100,00
B61	16,33	27,55	3,06	19,39	33,67	100,00
B62	15,62	11,91	3,53	27,68	41,27	100,00
B63	15,15	8,08	4,04	32,32	40,40	100,00
B64	17,17	8,08	5,05	30,30	39,39	100,00
B71	19,39	4,08	3,06	30,61	42,86	100,00
B72	15,00	7,00	3,00	26,00	49,00	100,00
B73	9,00	5,00	3,00	35,00	48,00	100,00
B74	18,56	5,15	3,09	27,84	45,36	100,00
B75	29,29	13,13	4,04	22,22	31,31	100,00
B81	16,33	7,14	3,06	27,55	45,92	100,00
B82	12,24	8,16	4,08	28,57	46,94	100,00
B83	17,53	3,09	3,09	29,90	46,39	100,00
B91	27,27	11,11	2,02	22,22	37,37	100,00
B92	18,37	3,06	2,04	23,47	53,06	100,00
M1	14,14	2,02	2,02	26,26	55,56	100,00
M4	13,40	3,09	2,06	25,77	55,67	100,00

Annexe 5 : Les états de surface, observations et mesures

VERSANT D' EL GOUAZINE
nip Beerkan 24/04/2003
SURFACE DES PARCELLES

Légende:

F:Surface fermée
O:Surface ouverte
C :Sol couvert

PB: pellicule de battance
CrS: croûte de sédimentation
CrE, St: croûte d'érosion, semelle de tassement
CaM: cailloux dans la masse

Fi: fissures profondes
Gal: galeries
Pores: porosité ouverte
M<1: mottes <1cm
M>1: mottes >1cm
M 5-8: mottes 5 à 8 cm

Vég_ramp.: végétation rampante et litière
CaP: cailloux posé
Vég_érigée: végétation érigée

Mesures tous les 10 cm sur une ligne de 10 m

Date	Parcelle	type de	REPARTITION DES SURFACES %				REPARTITION DES SURFACES FERMEES %				REPARTITION DES SURFACES OUVERTES %					
	n°	couvert	F	O	C	Sol Nu	PB	CrS	CrE, St	CaM	Fi	Gal	pores	M<1	1<M<5	M 5-8
			Surface fermée	Surface ouverte	Sol couvert	Sol nu	pellicule de battance	croûte de sédimentation	croûte d'érosion, semelle de tassement	cailloux dans la masse	Pellic_fiss	galeries	St. Grenue	mottes < 1 cm	mottes > 1 cm	mottes 5-8 cm
24/04/2003	Muntz 1	parcours	96,00	4,00	63,00	37,00	60,42	38,54	0,00	1,04	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00
24/04/2003	Muntz 2	parcours	96,00	4,00	45,00	55,00	77,08	14,58	0,00	8,33	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00
24/04/2003	Muntz 3	parcours	94,00	6,00	49,00	51,00	90,43	3,19	0,00	6,38	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00
24/04/2003	Muntz 5	parcours	91,00	9,00	56,00	44,00	91,21	1,10	0,00	7,69	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00
24/04/2003	B31	parcours	91,00	9,00	57,00	43,00	52,75	45,05	0,00	2,20	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00
24/04/2003	B62	parcours	19,00	81,00	75,00	25,00	57,89	0,00	0,00	42,11	59,26	0,00	40,74	0,00	0,00	0,00
24/04/2003	B63	parcours	73,00	27,00	56,00	44,00	80,82	0,00	0,00	19,18	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00
24/04/2003	B91	parcours	94,00	6,00	46,00	54,00	85,11	11,70	0,00	3,19	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00

Date	Parcelle	type de	SURFACES COUVERTES			
	n°	couvert	Vég_ramp.	Ca P	Vég_érigée	total %
24/04/2003	Muntz 1	parcours	59	4	0	63
24/04/2003	Muntz 2	parcours	39	6	0	45
24/04/2003	Muntz 3	parcours	39	10	0	49
24/04/2003	Muntz 5	parcours	24	15	17	56
24/04/2003	B31	parcours	57	0	0	57
24/04/2003	B62	parcours	58	9	8	75
24/04/2003	B63	parcours	20	20	17	57
24/04/2003	B91	parcours	41	1	4	46